



António Carlos Pereira Janes Monteiro

Licenciado em Engenharia Civil

Reforço de vigas de betão armado com armaduras exteriores de FRP

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil (Ramo de Estruturas e Geotecnia)

Orientador: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues,
FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia,
FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio

Arguente: Prof. Doutor António José da Silva Costa

Vogal: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Vogal: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro de 2014

António Carlos Pereira Janes Monteiro

Licenciado em Engenharia Civil

Reforço de vigas de betão armado com armaduras exteriores de FRP

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil (Ramo de Estruturas e Geotecnia)

Orientador: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues,
FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia,
FCT/UNL

Janeiro de 2014

Copyright António Janes Monteiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Com enorme satisfação, expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar ao Professor Carlos Chastre Rodrigues, meu orientador científico, agradeço profundamente a disponibilidade infindável, a dedicação, o rigor, a revisão crítica, os conhecimentos transmitidos e, principalmente, a amizade e o incentivo permanente proporcionando uma orientação exemplar.

Ao Professor Hugo Biscaia, meu co-orientador científico, pela sua disponibilidade e apoio dispensados, pelos elementos bibliográficos que me disponibilizou e pelos constantes esclarecimentos que me prestou ao longo deste último ano.

Ao Engenheiro Noel Franco, um agradecimento muito especial, pela ajuda incansável na montagem, preparação e realização dos ensaios experimentais. Pela amizade, apoio e companheirismo demonstrado ao longo deste último ano, contribuindo de forma determinante para a realização deste trabalho.

À minha família e à Helena, pelo apoio incondicional nos momentos de maior dificuldade e pela paciência e tempo dispensado na revisão e formatação do texto. Pelos conselhos e incentivos que foram determinantes para a minha formação como pessoa e para que esta etapa do meu percurso académico terminasse da melhor forma possível.

Aos meus amigos e colegas de curso pelos conselhos, incentivos e por compreenderem as minhas inúmeras ausências.

Aos técnicos de laboratório, os Srs. Jorge Silvério, José Gaspar e Victor Silva pelo auxílio prestado nos trabalhos laboratoriais.

À S&P Portugal, na pessoa do Engenheiro Filipe Dourado pela disponibilização dos laminados de CFRP e resina utilizada nos ensaios.

À HILTI Portugal, nas pessoas do Engenheiro Eduardo Teixeira e do Engenheiro David Pinto, pela disponibilização da resina utilizada nos ensaios e pelo empréstimo de equipamentos de furação das vigas e de injeção da resina epoxídicas.

A todos, muito obrigado!

Resumo

A presente dissertação vem no seguimento dos estudos realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa sobre o reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP (compósitos reforçados com fibras de carbono).

Numa primeira fase deste trabalho foram estudadas e desenvolvidas duas novas técnicas de reforço de vigas à flexão com laminados de CFRP, às quais foram atribuídas as designações de *Externally Bonded Reinforcement Anchorage* (EBRA) e *Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement* (HNSMR).

Estes sistemas de reforço foram estudados e testados em cinco vigas de betão armado de secção transversal em T, as quais foram levadas à rotura através de ensaios à flexão tendo em conta um sistema de aplicação de carga em quatro pontos. Para diferentes históricos de carregamento (monotónicos e cíclicos) foram analisados diversos parâmetros relacionados com a capacidade de mobilização da resistência à tração dos elementos de reforço, resistência máxima dos sistemas, ductilidade dos mesmos e eficiência destes perante situações de serviço. Com isto, realizou-se um estudo comparativo entre o desempenho destes sistemas de reforço e o de duas outras técnicas já estudadas, nomeadamente, os sistemas *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSMR).

Como complemento deste trabalho desenvolveu-se também um programa de cálculo em *MATLAB*, capaz de simular o problema em estudo através de um modelo numérico de análise não-linear de secções. A representatividade dos dados obtidos pelo modelo numérico foi verificada posteriormente através de uma análise comparativa entre estes e os valores experimentais obtidos.

Abstract

This thesis follows on from accomplished studies in the Civil Engineering Department of the *Universidade Nova de Lisboa* about the reinforcement to the bending of reinforced concrete beams with CFRP composites (reinforced composites with carbon fibers).

Initially, two new strengthening techniques using CFRP laminates were studied and developed in order to retrofit RC beams in bending. For these new techniques, the designation of *Externally Bonded Reinforcement Anchorage* (EBRA) and *Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement* (HNSMR) has been assigned.

These strengthening systems have been studied and tested into five reinforced concrete T beams, which were taken at break through bending tests, considering a load application system into four points. For different loading patterns (monotonic and cyclic) several parameters related to the ability of mobilization of tensile strength of strengthening elements, system's maximum resistance, their ductility and efficiency before service situations were analyzed. Therefore, a comparative study has been carried out between those strengthening systems performance and the one of two other techniques already studied, namely, the *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) and *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSMR) systems.

A code using MATLAB software was developed as a complement of this work, which is able to simulate the problem under study through a numeric model of nonlinear analysis of sections. The representativeness of obtained data by the numeric model has been verified afterwards through a comparative analysis between those and the obtained experimental ones.

Palavras Chave

Vigas

Betão armado

CFRP

Reforço à flexão

Análise experimental

Modelação numérica

Análise não-linear

Keywords

Beams

Reinforced Concrete

CFRP

Flexural structural strengthening

Experimental analysis

Numerical modelling

Non-linear analysis

Índice Geral

Agradecimentos.....	III
Resumo.....	V
Abstract.....	VII
Palavras Chave.....	IX
Keywords	IX
Índice Geral	XI
Índice de Figuras.....	XV
Índice de Tabelas.....	XXV
Lista de Símbolos	XXVII
1. Introdução	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objectivos da dissertação.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. Reforço à flexão de estruturas de betão com CFRP	5
2.1 Evolução histórica do reforço de estruturas de betão armado com compósitos FRP.....	5
2.2 Materiais compósitos FRP	7
2.2.1 Matrizes epoxídicas.....	9
2.2.2 Fibras.....	10
2.2.2.1 Fibras de carbono.....	11
2.2.3 Aditivos	12
2.2.4 Cargas de enchimento	12
2.3 Adesivos epoxídicos	13
2.4 Sistemas de reforço com compósitos de CFRP.....	14
2.4.1 Técnicas de reforço de vigas à flexão.....	14
2.4.1.1 Sistemas de impregnação <i>in situ</i>	15
2.4.1.2 EBR - Externally Bonded Reinforcement	16
2.4.1.3 NSMR - Near Surface Mounted Reinforcement.....	17
2.4.1.4 MF-FRP - Mechanically Fastened.....	19
2.4.2 Requisitos de desempenho para os sistemas de reforço com CFRP.....	20
2.4.2.1 Compatibilidade entre os materiais constituintes	20
2.4.2.2 Ao nível do material compósito de FRP	21
2.4.2.3 Ao nível do adesivo	22
2.4.2.4 Ao nível do betão.....	23
2.4.2.5 Durabilidade dos materiais constituintes	23
2.4.3 Modos de rotura	25
2.4.3.1 Roturas clássicas	26
2.4.3.2 Roturas prematuras	27

2.4.4	Interface betão-compósito.....	30
2.4.4.1	Ensaio de aderência	30
2.4.4.2	Modelos de comportamento da ligação betão-FRP	32
2.4.4.3	Modelos empíricos e semi-empíricos	33
2.5	Códigos e regulamentação atual	33
3.	Caracterização dos materiais	37
3.1	Considerações gerais	37
3.2	Aço	37
3.3	Betão.....	39
3.4	Compósitos de CFRP	41
3.4.1	Laminado de Fibra de Carbono S&P 150/2000 (10x1,4)	41
3.5	Adesivos epoxídicos	42
3.5.1	Resina S&P 220.....	42
3.5.2	Resina HILTI HIT-RE 500	44
4.	Programa Experimental	47
4.1	Considerações gerais	47
4.2	Descrição dos modelos de vigas utilizados	48
4.3	Preparação das vigas de betão armado	50
4.4	Sistema de ensaio	52
4.5	Apresentação das técnicas de reforço utilizadas.....	53
4.5.1	Técnica EBRA.....	53
4.5.1.1	Considerações gerais.....	53
4.5.1.2	Procedimento construtivo	56
4.5.2	Técnica HNSMR	68
4.5.2.1	Considerações gerais.....	68
4.5.2.2	Procedimento construtivo	69
4.6	Instrumentação e aquisição de dados.....	73
4.6.1	Extensómetros.....	74
4.6.2	Transdutores de deslocamento.....	76
4.6.3	Células de carga.....	80
4.6.4	Sistema de aquisição de dados.....	81
4.7	Procedimentos de ensaio	81
4.7.1	Ensaio Monotónicos.....	82
4.7.2	Ensaio Cíclicos.....	82
5.	Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais	85
5.1	Considerações gerais	85
5.2	Apresentação dos resultados experimentais	85
5.2.1	Ensaio monotónicos	85
5.2.1.1	Força vs Deslocamento	85

5.2.1.2	Deformada das vigas.....	87
5.2.1.3	Extensões nos laminados de CFRP.....	89
5.2.1.4	Curvatura nas vigas.....	93
5.2.1.5	Modos de rotura.....	95
5.2.2	Ensaio cíclico.....	99
5.2.2.1	Força vs Deslocamento.....	99
5.2.2.2	Deformada da viga.....	100
5.2.2.3	Extensões nos laminados de CFRP.....	101
5.2.2.4	Curvatura na viga.....	104
5.2.2.5	Modos de rotura.....	105
5.3	Análise dos resultados experimentais.....	108
5.3.1	Força versus Deslocamento.....	108
5.3.1.1	Regime elástico ou de pré-fendilhação.....	109
5.3.1.2	Regime de pós-fendilhação.....	109
5.3.1.3	Regime de pós-cedência.....	110
5.3.1.4	Regime de pós-rotura.....	112
5.3.1.5	Ensaio cíclico vs Ensaio monotónico.....	113
5.3.2	Deformada da viga.....	114
5.3.3	Deformação dos laminados de CFRP.....	117
5.3.4	EBRA vs EBR e HNSMR vs NSMR.....	120
6.	Modelação Numérica.....	127
6.1	Considerações gerais.....	127
6.2	Leis constitutivas dos materiais.....	127
6.2.1	Aço.....	127
6.2.2	Betão.....	129
6.2.3	Material composto de CFRP.....	133
6.3	Crítérios de rotura.....	134
6.4	Programa de cálculo e modelo numérico.....	137
6.5	Apresentação dos resultados.....	142
6.6	Análise dos resultados numéricos.....	163
7.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	167
7.1	Considerações gerais.....	167
7.2	Conclusões.....	167
7.3	Desenvolvimentos futuros.....	169
	Bibliografia.....	171

Índice de Figuras

Figura 2.1: <i>Monsanto House of the Future</i> [11].....	7
Figura 2.2: <i>American Pavillion in Brussels</i> [12].....	7
Figura 2.3: <i>Ibach Bridge</i> [13].....	7
Figura 2.4: Reforço de viga com laminados de CFRP.....	8
Figura 2.5: Reforço de viga com tecido de CFRP [16].....	8
Figura 2.6: Vários tipos de compósitos FRP pré-fabricados [18]	8
Figura 2.7: Filamento de fibra de carbono de 6 μm (a preto) e um fio de cabelo humano (a branco) [19]	11
Figura 2.8: Secção transversal de um filamento de fibra de carbono [17]	11
Figura 2.9: Aplicações de sistemas impregnados in situ [29, 30]	16
Figura 2.10: Aplicação de laminados de CFRP [31].....	17
Figura 2.11: Laminados de CFRP na técnica NSMR [36]	19
Figura 2.12: Varões de CFRP na técnica NSMR [36]	19
Figura 2.13: Aplicação da técnica NSMR [adaptado de 5].....	19
Figura 2.14: Elementos estruturais reforçados com a técnica MF-FRP [40, 41]	20
Figura 2.15: Laminado FRP utilizado na técnica MF-FRP [40]	20
Figura 2.16: Modos de rotura em vigas reforçadas com CFRP [adaptado 50]	25
Figura 2.17: Esmagamento do betão após plastificação das armaduras [adaptado de 52].....	26
Figura 2.18: Rotura do material de reforço após plastificação das armaduras [adaptado de 52].....	26
Figura 2.19: Esmagamento do betão sem plastificação das armaduras ordinárias [adaptado de 52].....	26
Figura 2.20: Roturas prematuras por perda de aderência na técnica EBR.....	27
Figura 2.21: Roturas prematuras por peeling-off [adaptado de 20]	28
Figura 2.22: Rotura na interface adesivo-FRP [adaptado de 53]	29
Figura 2.23: Rotura do adesivo próximo do FRP [adaptado de 53].....	29
Figura 2.24: Rotura na interface rasgo-adesivo [adaptado de 53].....	29
Figura 2.25: Rotura no betão próximo do rasgo [adaptado de 53].....	29
Figura 2.26: Rotura no adesivo [adaptado de 53]	29
Figura 2.27: Rotura no betão e adesivo ao longo de planos inclinados [adaptado de 53].....	29
Figura 2.28: Rotura no betão [adaptado de 53].....	30
Figura 2.29: Rotura de canto [adaptado de 53]	30
Figura 2.30: Ensaio de corte de junta dupla [adaptado de 2]	31
Figura 2.31: Ensaio de corte de junta simples [adaptado de 2].....	31
Figura 2.32: Ensaio de flexão com entalhe a meio vão [adaptado de 2].....	31
Figura 2.33: Distribuição das tensões no modelo de flexão [adaptado de 54]	32

Figura 2.34: Distribuição das tensões no modelo de corte [adaptado de 54]	32
Figura 2.35: Modelos de comportamento da ligação betão-FRP [adaptado de 58].....	33
Figura 3.1: Diagrama tensão-deformação referentes aos varões de aço endurecidos a frio (Ø6) [3]38	
Figura 3.2: Diagrama tensão-deformação referentes aos varões de aço laminados a quente (Ø8) [3]	38
Figura 3.3: Diagrama tensão-deformação referentes aos varões de aço laminados a quente (Ø12) [3]	38
Figura 3.4: Laminado de Fibra de Carbono S&P 150/2000 (10x1,4)	41
Figura 3.5: Diagrama tensão-deformação dos provetes de laminado S&P 150/2000 (10x1,4) testados á tração [3]	42
Figura 3.6: Dois componentes da resina S&P 220	43
Figura 3.7: Diagrama tensão-deformação de tração da resina S&P 220 quando submetida á flexão [3]	44
Figura 3.8: Pormenor dos três provetes	44
Figura 3.9: Diagrama tensão-deformação da resina HILTI HIT RE 500 quando submetida á flexão	45
Figura 4.1: Vigas utilizadas	48
Figura 4.2: Pormenorização longitudinal das vigas em estudo	49
Figura 4.3: Pormenorização transversal das vigas em estudo	49
Figura 4.4: Preparação e montagem das armaduras ordinárias [3].....	51
Figura 4.5: Linha de betonagem das vigas estudadas [3]	51
Figura 4.6: Betonagem das vigas estudadas [3]	51
Figura 4.7: Cura do betão das vigas estudadas [3]	51
Figura 4.8: Transmissão de cargas em quatro pontos.....	52
Figura 4.9: Sistema de ensaio; a) célula de carga; b) Apoio deslizante; c) Apoio dos perfis metálicos;.....	53
Figura 4.10: Secção transversal de meio-vão da viga reforçada com a técnica EBRA	54
Figura 4.11: Sistema de ancoragem do material de reforço ao elemento estrutural	54
Figura 4.12: Pormenor do arco de transição para o furo de amarração	55
Figura 4.13: Decapagem da superfície de betão	57
Figura 4.14: Inclinação dos furos de amarração	58
Figura 4.15: Diagrama de forças estimado no instante da cedência das armaduras e da rotura do CFRP	59
Figura 4.16: Zona admissível para execução dos furos de amarração.....	59
Figura 4.17: Vista inferior das duas extremidades de uma das vigas estudadas e posicionamento dos furos em relação aos varões longitudinais	60
Figura 4.18: Guia de furação adoptado	60

Figura 4.19: Furação com broca de diâmetro de 12 milímetros.....	61
Figura 4.20: Limpeza dos furos com escovilhão (à esquerda) e com ar comprimido (à direita)	61
Figura 4.21: Execução das zonas de transição para os furos de amarração do CFRP	61
Figura 4.22: Aspecto final dos furos de amarração do CFRP	61
Figura 4.23: Marcação do laminado.....	62
Figura 4.24: Colagem da fita adesiva.....	62
Figura 4.25: Fios dos extensómetros separados	63
Figura 4.26: Aplicação da cola.....	63
Figura 4.27: Auxílio da folha de polietileno na operação de colagem do extensómetro	63
Figura 4.28: Fixação dos fios do extensómetro ao laminado CFRP	64
Figura 4.29: Dispensador ED3500.....	64
Figura 4.30: Mistura da resina S&P220	64
Figura 4.31: Colagem da fita adesiva na base da viga	65
Figura 4.32: Introdução da resina HILTI HIT-RE 500 com o dispensador ED3500.....	65
Figura 4.33: Introdução da resina S&P220 com o sistema improvisado de injeção	65
Figura 4.34: Aspecto final dos furos preenchidos com as resinas utilizadas	66
Figura 4.35: Aplicação da resina S&P220 na superfície da viga	66
Figura 4.36: Cura das resinas	67
Figura 4.37: Laminado de CFRP ancorado no interior de um furo.....	67
Figura 4.38: Secção transversal de meio-vão da viga reforçada com a técnica EBRA.....	68
Figura 4.39: Sistema de ancoragem do material de reforço ao elemento estrutural.....	69
Figura 4.40: Pormenor dos laminados logo após a colagem.....	70
Figura 4.41: Abertura dos rasgos na face lateral da alma da viga.....	71
Figura 4.42: Serra elétrica utilizada para a abertura dos rasgos.....	71
Figura 4.43: Aplicação do adesivo epoxídico e nivelamento da superfície intervencionada.....	73
Figura 4.44: Aspecto final do modelo V9 reforçado.....	73
Figura 4.45: Vista frontal (à esquerda) e posterior (à direita) da viga instrumentada.....	74
Figura 4.46: Colagem dos extensómetros nas armaduras ordinárias [3].....	75
Figura 4.47: Instrumentação dos laminados do modelo V6.....	75
Figura 4.48: Instrumentação dos modelos V7 e V8 num dos laminados	75
Figura 4.49: Instrumentação dos laminados dos modelos V9 e V10	76
Figura 4.50: Transdutores de deslocamento TML-CDP100 alinhados na superfície da viga.....	77
Figura 4.51: Transdutor de deslocamento TML-DP-500E com o fio recolhido para o interior da caixa do mesmo.....	77
Figura 4.52: Transdutores de deslocamento TML-CDP50 encostados nas extremidades do CFRP dos modelos V9 e V10	78
Figura 4.53: Transdutor de deslocamentos horizontais [30]	78

Figura 4.54: Sistema de ligação dos transdutores de deslocamentos horizontais á viga em estudo.	79
Figura 4.55: Ligação do transdutor de deslocamentos horizontais aos respectivos apoios.....	79
Figura 4.56: Sistema de dez transdutores de deslocamentos horizontais	79
Figura 4.57: Dispositivo de calibração dos transdutores	80
Figura 4.58: Célula de carga utilizada	80
Figura 4.59: <i>Dataloger HBM Centipede 100 – UPM100</i>	81
Figura 4.60: <i>Dataloger HBM Spider 8</i>	81
Figura 4.61: Diagrama Deslocamento vs Tempo do ensaio da viga V7.....	83
Figura 4.62: Diagrama Força vs Tempo do ensaio da viga V7.....	83
Figura 4.63: Diagrama Deslocamento vs Tempo do ensaio da viga V10.....	83
Figura 4.64: Diagrama Força vs Tempo do ensaio da viga V10.....	83
Figura 5.1: Diagrama Força vs Deslocamento do modelo da viga V1 (Referência) [3]	86
Figura 5.2: Relação Força vs Deslocamento do modelo da viga V6 (EBRA).....	86
Figura 5.3: Relação Força vs Deslocamento do modelo V8 (EBRA)	86
Figura 5.4: Relação Força vs Deslocamento do modelo da viga V9 (HNSMR)	87
Figura 5.5: Deformada do modelo da viga V1 ao longo do carregamento (Referência) [3]	88
Figura 5.6: Deformada do modelo da viga V6 ao longo do carregamento (EBRA)	88
Figura 5.7: Deformada do modelo da viga V8 ao longo do carregamento (EBRA)	88
Figura 5.8: Deformada do modelo V9 ao longo do carregamento (HNSMR)	89
Figura 5.9: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo da viga V6 ao longo do carregamento (EBRA)	90
Figura 5.10: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo da viga V8 ao longo do carregamento (EBRA)	90
Figura 5.11: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo da viga V9 ao longo do carregamento (HNSMR)	90
Figura 5.12: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo da viga V6 no instante da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do sistema.....	91
Figura 5.13: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo da viga V8 no instante da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do sistema.....	91
Figura 5.14: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo V9 no instante da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do sistema.....	91
Figura 5.15: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V6 (EBRA).....	92
Figura 5.16: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V8 (EBRA).....	93
Figura 5.17: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V9 (HNSMR)	93

Figura 5.18: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação e cedência das armaduras do modelo V1 [3]	94
Figura 5.19: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação, cedência e rotura do modelo V6	94
Figura 5.20: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação, cedência e rotura do modelo V8	94
Figura 5.21: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação, cedência e rotura do modelo V9	95
Figura 5.22: Aspecto global da viga V6 (EBRA) após o ensaio monotónico.....	95
Figura 5.23: Aspecto global da viga V8 (EBRA) após o ensaio monotónico.....	96
Figura 5.24: Aspecto global da viga V9 (HNSMR) após o ensaio monotónico	96
Figura 5.25: Fendilhação ao longo do comprimento da viga V8	97
Figura 5.26: Fendilhação mais acentuada nas zonas de formação de rótulas plásticas na viga V8.	97
Figura 5.27: Descolamento do CFRP em zonas intermédias da viga observado nos modelos V6 e V8.....	97
Figura 5.28: Esmagamento do betão na face superior do banzo da viga nos modelos V6 e V8.....	97
Figura 5.29: Pormenores da pós-rotura do laminado de CFRP dos modelos V6 e V8	97
Figura 5.30: Pormenor da fendilhação do betão nos instantes iniciais do ensaio da viga V9.....	98
Figura 5.31: Pormenor da fenda longitudinal ao nível do rasgo na alma da viga V9	98
Figura 5.32: Escorregamento do CFRP na viga V9	98
Figura 5.33: Pormenor da cunha de betão na viga V9	98
Figura 5.34: Destacamento do betão na viga V9	98
Figura 5.35: Diagrama Força vs Deslocamento do modelo da viga V7 (EBRA)	99
Figura 5.36: Diagrama Força vs Deslocamento do modelo da viga V10 (HNSMR).....	99
Figura 5.37: Deformada do modelo V7 ao longo do carregamento (EBRA).....	100
Figura 5.38: Deformada do modelo V10 ao longo do carregamento (HNSMR)	101
Figura 5.39: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo V7 ao longo do carregamento (EBRA)	102
Figura 5.40: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo V10 ao longo do carregamento (HNSMR)	102
Figura 5.41: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo V7 no instante da cedência das armaduras e rotura do sistema	103
Figura 5.42: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo V10 no instante da cedência das armaduras e rotura do sistema	103
Figura 5.43: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V7 (EBRA)	104

Figura 5.44: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V10 (HNSMR)	104
Figura 5.45: Curvaturas observadas no instante da fendilhação, cedência e rotura do modelo V7 (EBRA).....	105
Figura 5.46: Curvaturas observadas no instante da fendilhação, cedência e rotura do modelo V10 (HNSMR)	105
Figura 5.47: Aspecto global da viga V7 (EBRA) após o ensaio cíclico.....	106
Figura 5.48: Aspecto global da viga V10 (HNSMR) após o ensaio cíclico	106
Figura 5.49: Permanência do CFRP no interior dos furos após a rotura do modelo V7 (EBRA) ..	106
Figura 5.50: Fendas na zona traccionada e esmagamento do betão na viga V7 (EBRA).....	106
Figura 5.51: Corte longitudinal na zona de amarração do CFRP da viga V7.....	107
Figura 5.52: Rotura do laminado de CFRP no interior do rasgo do modelo V10 (HNSMR)	107
Figura 5.53: Diagrama Força vs Deslocamento característico de uma viga de betão armado reforçada com laminados de CFRP	108
Figura 5.54: Regime de pós-fendilhação e instante de cedência das armaduras dos modelos ensaiados.....	110
Figura 5.55: Regime de pós-cedência dos modelos ensaiados	111
Figura 5.56: Regime de pós-rotura dos modelos ensaiados	112
Figura 5.57: Relação Força vs Deslocamento dos modelos V7 (cíclico) e V8 (monotonico).....	113
Figura 5.58: Relação Força vs Deslocamento dos modelos V9 (monotonico) e V10 (cíclico).....	113
Figura 5.59: Deformada dos modelos V1 (referência), V6 (EBRA), V7 (EBRA), V8 (EBRA) e V9 (HNSMR) para o instante da carga de cedência das armaduras do modelo de referência (85,5 kN)	115
Figura 5.60: Deformada dos modelos V1, V6, V7, V8 e V9 na cedência das armaduras e na rotura do CFRP	115
Figura 5.61: Deformada dos modelos V7 (cíclico) e V8 (Monotónico).....	116
Figura 5.62: Deformada dos modelos V9 (Monotónico) e V10 (Cíclico).....	117
Figura 5.63: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP dos modelos reforçados com a técnica EBRA (V6, V7, V8)	118
Figura 5.64: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP dos modelos reforçados com a técnica HNSMR (V9, V10)	119
Figura 5.65: Relação momento flector vs extensão nos laminados de CFRP (meio vão) dos modelos V6, V8, V9	120
Figura 5.66: Relações Força vs Deslocamento a meio vão dos modelos V2 (EBR), V6 (EBRA) e V8 (EBRA) testados com carregamento monotónico	121
Figura 5.67: Relações Força vs Deslocamento a meio vão dos modelos V4 (NSMR), V9 (HNSMR) testados com carregamento monotónico.....	122

Figura 5.68: Deformada dos modelos V2 (EBR) [3], V6 (EBRA) e V8 (EBRA) na cedência das armaduras e na rotura do CFRP	124
Figura 5.69: Deformada dos modelos V4 (NSMR) [3] e V9 (NSRMA) na cedência das armaduras e na rotura do CFRP.....	124
Figura 5.70: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP do modelo V2 (EBR).....	125
Figura 5.71: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP do modelo V4 (NSMR)	126
Figura 6.1:Diagrama tensão-deformação correspondente ao modelo analítico de Park-Pauley (1975) [adaptado de 30].....	128
Figura 6.2:Modelo de betão simples à compressão para análise não-linear proposto pelo EC2 [adaptado 69].....	129
Figura 6.3:Relação tensão vs extensão proposta no MC 2010 [73] para a fase pré-fendilhada do betão.....	130
Figura 6.4: Relação tensão vs extensão proposta no MC 2010 [73] para a fase pós-fendilhada do betão.....	130
Figura 6.5: Modelo do betão à tração proposto pelo MC 2010 [73] utilizado na modelação numérica.....	131
Figura 6.6:Modelo do betão á tração proposto por Popovics [74]	132
Figura 6.7:Exemplos de diagramas tensão-deformação típicos para CFRP, GFRP e AFRP [adaptado 73].....	134
Figura 6.8: Relação percentagem de armadura equivalente vs grau de utilização do CFRP	136
Figura 6.9:Fluxograma dos quatro módulos do programa de cálculo realizado	141
Figura 6.10: Secção transversal da viga V1	143
Figura 6.11: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V1 (dados numéricos e experimentais)..	143
Figura 6.12: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V1	143
Figura 6.13: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V1	144
Figura 6.14: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V1	144
Figura 6.15:Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V1	144
Figura 6.16: Secção transversal da viga V2.....	145
Figura 6.17: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V2 (dados numéricos e experimentais).....	145
Figura 6.18: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V2 (dados numéricos e experimentais)..	145
Figura 6.19: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V2	145

Figura 6.20: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V2.....	146
Figura 6.21: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V2	146
Figura 6.22: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V2	146
Figura 6.23: Secção transversal da viga V3	147
Figura 6.24: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V3 (dados numéricos e experimentais)	147
Figura 6.25: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V3 (dados numéricos e experimentais)...	147
Figura 6.26: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V3.....	147
Figura 6.27: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V3.....	148
Figura 6.28: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V3	148
Figura 6.29: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V3	148
Figura 6.30: Secção transversal da viga V4	149
Figura 6.31: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V4 (dados numéricos e experimentais)	149
Figura 6.32: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V4 (dados numéricos e experimentais)...	149
Figura 6.33: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V4.....	149
Figura 6.34: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V4.....	150
Figura 6.35: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V4	150
Figura 6.36: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V4	150
Figura 6.37: Secção transversal da viga V5	151
Figura 6.38: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V5 (dados numéricos e experimentais)	151
Figura 6.39: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V5 (dados numéricos e experimentais)...	151
Figura 6.40: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V5.....	151

Figura 6.41: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V5	152
Figura 6.42: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V5.....	152
Figura 6.43: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V5.....	152
Figura 6.44: Secção transversal da viga V6.....	153
Figura 6.45: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V6 (dados numéricos e experimentais).....	153
Figura 6.46: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V6 (dados numéricos e experimentais) ..	153
Figura 6.47: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V6	153
Figura 6.48: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V6	154
Figura 6.49: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V6.....	154
Figura 6.50: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V6.....	154
Figura 6.51: Secção transversal da viga V7.....	155
Figura 6.52: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V7 (dados numéricos e experimentais).....	155
Figura 6.53: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V7 (dados numéricos e experimentais) ..	155
Figura 6.54: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V7	155
Figura 6.55: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V7	156
Figura 6.56: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V7.....	156
Figura 6.57: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V7.....	156
Figura 6.58: Secção transversal da viga V8.....	157
Figura 6.59: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V8 (dados numéricos e experimentais).....	157
Figura 6.60: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V8 (dados numéricos e experimentais) ..	157
Figura 6.61: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V8	157

Figura 6.62: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V8.....	158
Figura 6.63: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V8	158
Figura 6.64: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V8	158
Figura 6.65: Secção transversal da viga V9	159
Figura 6.66: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V9 (dados numéricos e experimentais)	159
Figura 6.67: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V9 (dados numéricos e experimentais)...	159
Figura 6.68: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V9.....	159
Figura 6.69: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V9.....	160
Figura 6.70: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V9	160
Figura 6.71: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V9	160
Figura 6.72: Secção transversal da viga V10.....	161
Figura 6.73: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V10 (dados numéricos e experimentais)	161
Figura 6.74: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V10 (dados numéricos e experimentais).	161
Figura 6.75: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V10.....	161
Figura 6.76: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V10.....	162
Figura 6.77: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V10	162
Figura 6.78: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V10	162

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Propriedades das resinas termoentrecíveis [adaptado de 5]	10
Tabela 2.2: Propriedades típicas da fibra de carbono [adaptado 20].....	12
Tabela 2.3: Propriedades típicas dos adesivos epoxídicos [20]	14
Tabela 3.1: Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do aço [3]	37
Tabela 3.2: Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do betão aos 28 dias de idade [3] ...	40
Tabela 3.3: Extrapolação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização do betão para as idades relativas às datas dos respectivos ensaios das vigas em estudo	40
Tabela 3.4: Resumo dos dados obtidos com os ensaios de caracterização do CFRP:.....	42
Tabela 3.5: Resumo dos resultados obtidos com os ensaios de caracterização da resina à tração por flexão.....	44
Tabela 3.6: Resumo dos dados obtidos com os ensaios de caracteriza.....	45
Tabela 4.1: Resumo dos modelos utilizados	50
Tabela 5.1: Síntese dos valores obtidos de força e momento flector na cedência das armaduras e rotura para os modelos V1, V6, V8 e V9	87
Tabela 5.2: Sínteses dos valores obtidos de deslocamentos a meio vão na cedência das armaduras e na rotura para os modelos V1, V6, V8 e V9	89
Tabela 5.3: Síntese dos principais valores de extensão no CFRP dos modelos das vigas V6, V8 e V9.....	92
Tabela 5.4: Síntese dos valores obtidos de força e momento flector na fendilhação, cedência das armaduras e rotura para os modelos das vigas V7 e V10.....	100
Tabela 5.5: Síntese dos deslocamentos a meio vão na cedência das armaduras e na rotura para os modelos V7 e V10.....	101
Tabela 5.6: Síntese dos principais valores obtidos de extensão no CFRP dos modelos V7 e V10	103
Tabela 5.7: Comparação entre o desempenho dos modelos monotónicos e cíclicos para cada técnica de reforço	114
Tabela 5.8: Incremento de deformação entre a cedência das armaduras e a rotura do CFRP dos modelos V6, V8, V9	116
Tabela 5.9: Síntese dos valores obtidos de força e deslocamento a meio vão na cedência das armaduras e rotura para os modelos V2 (EBR) [3], V6 (EBRA) e V8 (EBRA).....	121
Tabela 5.10: Síntese dos valores obtidos de força e deslocamento a meio vão na cedência das armaduras e rotura para os modelos V4 (NSMR) e V9 (HNSMR).....	123
Tabela 5.11: Incremento de deformação entre a cedência das armaduras e a rotura do CFRP dos modelos testados com carregamento monotónico.....	124

Tabela 5.12: Síntese dos principais valores obtidos de extensão no CFRP dos modelos V2 (EBR) [3], V6 (EBRA) e V8 (EBRA)	125
Tabela 5.13: Síntese dos principais valores obtidos de extensão no CFRP dos modelos V4 (NSMR), V9 (HNSMR)	126
Tabela 6.1: Dados relativos à análise do critério de rotura para sistemas NSMR	136
Tabela 6.2: Dados inseridos no programa para o modelo V1	143
Tabela 6.3: Dados inseridos no programa para o modelo V2	145
Tabela 6.4: Dados inseridos no programa para o modelo V3	147
Tabela 6.5: Dados inseridos no programa para o modelo V4	149
Tabela 6.6: Dados inseridos no programa para o modelo V5	151
Tabela 6.7: Dados inseridos no programa para o modelo V6	153
Tabela 6.8: Dados inseridos no programa para o modelo V7	155
Tabela 6.9: Dados inseridos no programa para o modelo V8	157
Tabela 6.10: Dados inseridos no programa para o modelo V9	159
Tabela 6.11: Dados inseridos no programa para o modelo V10	161
Tabela 6.12: Resumo dos dados numéricos e experimentais obtidos a meio vão das vigas V1 a V10	163

Lista de Símbolos

Siglas

ACI	<i>Américan Concrete Institute</i>
CCC	<i>Association of Composite Materials Using Continuous Fiber for Concrete Reinforcement</i>
CEB	<i>Comité Européen du Béton</i>
CEN	<i>Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymers</i>
CNR	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
EBR	<i>Externally Bonded Reinforcement</i>
EBRA	<i>Externally Bonded Reinforcement Anchorage</i>
EMPA	<i>Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research</i>
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
FIP	<i>Fédération Internationale de la Précontrainte</i>
FRP	<i>Fiber Reinforcement Polymers</i>
HM	<i>High Modulus</i>
HNSMR	<i>Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement</i>
HS	<i>High Strength</i>
ISIS	<i>Intelligent Sensing for Innovative Structures</i>
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
MF-FRP	<i>Mechanically Fastened</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NCE	<i>Networks of centre of Excellence</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NSMR	<i>Near Surface Mounted Reinforcement</i>
PAN	<i>Fibras de poliacrilonitrilo</i>
PTV	<i>Princípio dos Trabalhos Virtuais</i>
UHM	<i>Ultra High Modulus</i>
UHS	<i>Ultra High Strength</i>

Notações escalares latinas

$A_{c,eff}$	Área efetiva do betão traccionado
A_f	Área do material de reforço
A_s	Área do aço
E_{ci}	Módulo de elasticidade tangente
E_c	Módulo de elasticidade do betão
E_{ci}	Módulo de elasticidade tangente
E_{cm}	Módulo de elasticidade média do betão
E_f	Módulo de elasticidade do FRP
E_{fm}	Módulo de elasticidade média do FRP
E_{pt}	Módulo de elasticidade da resina
E_{ptm}	Módulo de elasticidade média da resina
E_s	Módulo de elasticidade do aço
E_{sm}	Módulo de elasticidade média do aço
F_c	Força no betão comprimido (numérica)
F_{cr}	Carga aplicada no instante de fendilhação
F_f	Força no FRP (numérica)
F_{max}	Força máxima
F_r	Carga aplicada no instante de rotura
F_s	Força no aço (numérica)
F_t	Força no betão traccionado (numérica)
F_y	Força no instante de cedência das armaduras
G_f	Energia de Fractura
K_m	Coefficiente de limitação de extensão no FRP
I_{cr}	Momento de inércia da secção não fendilhada
L	Comprimento
L_p	Comprimento da rótula plástica
M	Momento flector
M_{cr}	Momento flector no instante de fendilhação
M_r	Momento flector no instante de rotura
M_y	Momento flector no instante da cedência das armaduras
n_p	Coefficiente de ajuste da função de Popovics
T_{ci}	Tensão no betão comprimido (numérica)
T_f	Tensão no FRP (numérica)

T_s	Tensão no aço (numérica)
T_{ti}	Tensão no betão traccionado (numérica)
W	Abertura de fendas
k_m	Coefficiente de limitação da extensão no FRP
X_i	Linha neutra numérica
Z_i	Distância entre o centro de gravidade dos filamentos e a face da secção transversal
X_{i-1}	Linha neutra numérica (ciclo anterior)
b	Largura
b_i	Largura do filamento (numérica)
d	Altura útil
d_f	Distância entre a face superior da viga e o centro de gravidade do FRP
$f_{0,2m}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%
f_c	Tensão de compressão do betão
f_{cm}	Tensão de rotura à compressão média provetes cilindros de betão
$f_{ct,fl}$	Tensão de rotura por flexão do betão
f_{ctm}	Tensão de rotura à tração média do betão
f_f	Tensão de rotura do FRP
f_{fm}	Tensão de rotura média do FRP
f_{pt}	Tensão de rotura à tração da resina
f_{ptm}	Tensão de rotura à tração média da resina
f_{tm}	Tensão de rotura média à tração do aço
f_{ym}	Tensão de cedência média do aço
h	Altura
h_i	Altura do filamento (numérica)
S_{rm}	Espaçamento médio entre fendas
t_f	Espessura do material de reforço
u_s	Perímetro de aderência do aço
u_f	Perímetro de aderência do FRP

Notações escalares gregas

$\Delta_{\delta_{FyV1}}$	Variação do deslocamento vertical para a força de cedência da viga de referência
Δ_{Fcr}	Variação da carga no instante de fendilhação
Δ_{Fmax}	Variação da força máxima
Δ_{Fr}	Variação da carga no instante de rotura
Δ_{Fy}	Variação da carga no instante de cedência das armaduras
Δ_{Mcr}	Variação do momento flector de fendilhação
Δ_{Mr}	Variação do momento flector de rotura
Δ_{My}	Variação do momento flector de cedência
$\Delta_{\delta Fmax}$	Variação do deslocamento vertical na força máxima
$\Delta_{\delta r}$	Variação do deslocamento vertical de rotura
$\Delta_{\delta y}$	Variação do deslocamento vertical de cedência das armaduras
β_u	Grau de utilização do CFRP
δ_{Fmax}	Deslocamento vertical da força máxima
δ_{FyV1}	Deslocamento vertical para a força de cedência da viga de referência
δ_{cr}	Deslocamento vertical no instante de fendilhação
δ_r	Deslocamento vertical no instante de rotura
δ_y	Deslocamento vertical no instante de cedência
ε_c	Extensão no betão em compressão
ε_{c1}	Extensão correspondente à tensão máxima do betão à compressão
ε_{cinf}	Extensão na fibra inferior do betão (numérica)
ε_{csup}	Extensão na fibra superior do betão (numérica)
ε_{ct}	Extensão do betão em tração
ε_{cu1}	Extensão última do betão à compressão
$\varepsilon_{ct,max}$	Extensão correspondente ao valor de f_{ctm} no modelo de tração do betão
$\varepsilon_{f,r}$	Extensão no laminado de CFRP no instante de rotura
$\varepsilon_{f,u}$	Extensão última do laminado de CFRP (valor médio)
$\varepsilon_{f,y}$	Extensão no laminado de CFRP no instante de cedência
ε_f	Extensão de rotura do FRP
ε_{fi}	Extensão de início do cálculo (numérica)
ε_{fi-1}	Extensão numérica de início do cálculo (ciclo anterior)
$\varepsilon_{f\limite}$	Extensão limite no CFRP (numérica)
ε_{fm}	Extensão de rotura média do FRP

$\varepsilon_{fm\acute{a}x,r}$	Extensão máxima no CFRP obtida na rotura
$\varepsilon_{fm\acute{a}x,y}$	Extensão máxima no CFRP obtida na cedência da armadura
ε_{pt}	Extensão de rotura à tração da resina
ε_{ptm}	Extensão de rotura à tração média da resina
ε_{sh}	Extensão de endurecimento
$\varepsilon_{sr\acute{m}}$	Extensão total do aço na rotura
ε_{sum}	Extensão total do aço na força máxima
ε_{sy}	Extensão de cedência do aço
ε_{uk}	Extensão de rotura do aço
β	Ângulo do furo de amarração com a horizontal
σ_{ct}	Tensão de tração no betão
σ_s	Tensão no aço
σ_f	Tensão no FRP
ρ_{eq}	Percentagem de armadura equivalente
φ	Curvatura

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

O betão armado, como material de construção que é, tornou-se um dos mais importantes elementos da arquitetura do séc. XX. Neste período, o betão armado veio revolucionar a construção civil e passou a ser o material de eleição na execução de estruturas.

No entanto, devido principalmente ao desconhecimento, os aspetos inerentes à durabilidade dos materiais eram fortemente negligenciados. Pelas razões mencionadas, e devido ao constante desenvolvimento tecnológico com consequente necessidade de aumento da sobrecarga na estrutura dos edifícios, começaram a surgir os problemas que ignorados até há alguns anos, realçaram os pontos fracos do “material milagroso”[1]. Desta forma, graves problemas surgiram nas estruturas existentes, crescendo constantemente até aos dias de hoje a necessidade de recorrer a medidas de reparação e reforço, restabelecendo as condições de uso das estruturas existentes. Refira-se que estas medidas não abrangem o mesmo tipo de intervenções. Assim, uma intervenção de reparação procura repor o desempenho dos materiais danificados existentes por substituição de outros com características semelhantes. Por outro lado, uma intervenção de reforço pretende melhorar a resistência ou ductilidade dos elementos estruturais aperfeiçoando o seu desempenho em relação à situação inicial [2].

Com base no crescente número de edifícios e estruturas degradadas com origem em diversas causas, a comunidade científica tem vindo a envidar esforços pela obtenção de novas técnicas de reforço. Tendo como objetivo o desenvolvimento de sistemas que incorporem a utilização de novos materiais, estas são criadas para corresponder às necessidades existentes, fornecendo alternativas de reforço eficazes e ao mesmo tempo duradouras.

De entre as técnicas de reforço de estruturas de betão que hoje se podem enumerar, merecem particular ênfase as que utilizam como material base os polímeros reforçados com fibras de carbono (*Fiber Reinforcement Polymers* – FRP). O FRP, pela sua elevada rigidez, reduzido peso, bom comportamento à fadiga, imunidade à corrosão, versatilidade geométrica e pela crescente redução de custos de produção, veio assim oferecer um novo caminho à engenharia de estruturas [3, 4]. Com este material, a comunidade científica tem desenvolvido, ao longo das últimas duas décadas, novas técnicas de reforço que nos dias de hoje complementam e correspondem a

excelentes alternativas aos sistemas tradicionais à disposição da comunidade técnica (encamisamentos em betão, colagem de chapas metálicas, entre outros).

Contudo, devido à versatilidade destes materiais compósitos na construção civil, existe ainda a necessidade de adquirir cada vez mais conhecimentos acerca do seu comportamento perante as solicitações que lhes são exigidas. Torna-se, por isso, fundamental continuar este percurso de investigação de forma a compreender cada uma das soluções já utilizadas e desenvolvendo novos sistemas de reforço que melhorem o desempenho dos elementos estruturais e minimizem os inconvenientes das técnicas já existentes.

1.2 Objectivos da dissertação

Os resultados experimentais de diversos estudos científicos têm provado que a aplicação de compósitos reforçados com fibras (FRP) como material de reforço permitem aumentar significativamente a resistência e rigidez do elemento estrutural reforçado. Contudo, são várias as técnicas de reforço que, devido à ocorrência de roturas prematuras, não permitem que o nível máximo de tensão mobilizada no FRP seja equivalente à resistência última do mesmo.

Neste sentido, e para obviar este inconveniente, no âmbito desta dissertação foram estudadas e desenvolvidas duas novas técnicas de reforço à flexão utilizando laminados de CFRP (materiais compósitos reforçados com fibras de carbono). Com estas técnicas pretende-se que os materiais compósitos utilizados aumentem a capacidade resistente à flexão das vigas de betão armado, mobilizando a totalidade ou grande parte da resistência do FRP à tração.

Para este estudo foi idealizada uma campanha de ensaios experimentais levados a cabo nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, que permitiu realizar cinco ensaios à flexão a cinco vigas em betão armado de secção transversal em T. Sendo este um trabalho que surge na sequência de investigações realizadas anteriormente [3] ao mesmo tipo de vigas, procura-se realizar um estudo comparativo entre o desempenho do CFRP nos sistemas já testados e nos que aqui são propostos. Adicionalmente, no sentido de fornecer uma ferramenta eficaz para o dimensionamento destes e de outros sistemas de reforço, foi também desenvolvido um programa de cálculo utilizando o software *MATLAB* que consiste num modelo numérico de análise não-linear de secções de vigas em betão armado reforçadas com materiais compósitos. De forma mais aprofundada é então possível enumerar os seguintes objectivos, pelos quais a presente dissertação foi orientada:

- i. Através de uma pesquisa bibliográfica, reunir o principal conhecimento e estado da arte do que ao reforço à flexão de vigas com CFRP diz respeito.
- ii. Caracterizar através de ensaios laboratoriais, todos os materiais necessários ao presente estudo;
- iii. Reforçar, através das técnicas propostas no âmbito desta dissertação, cinco vigas em betão armado com laminados de CFRP;
- iv. Instrumentar todos os modelos reforçados de forma a permitir a aquisição de dados referentes a cargas, deslocamentos, extensões, curvaturas, entre outros;
- v. Com base em dois tipos de carregamento (monotónicos e cíclicos) realizar ensaios de flexão em quatro pontos às vigas reforçadas;
- vi. Analisar os resultados obtidos e tirar as devidas conclusões acerca do desempenho estrutural dos sistemas em estudo, identificando as diferenças entre eles.
- vii. Analisar comparativamente a eficácia entre as técnicas propostas e outras já estudadas anteriormente na Universidade Nova de Lisboa, avaliando de que forma a amarração realizada aos elementos de CFRP influencia os resultados obtidos;
- viii. Desenvolvimento de um programa de cálculo ajustável a diferentes secções transversais e sistemas de reforço, capaz de simular o problema em estudo;
- ix. Analisar comparativamente os resultados experimentais com os valores e diagramas obtidos numericamente, através do programa de cálculo realizado.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, incluindo a introdução e conclusão, os quais serão de seguida descritos sumariamente.

No **Capítulo 2**, são reunidos todos os elementos pertencentes ao estado da arte que foram adquiridos através da pesquisa bibliográfica realizada. Desta forma, é apresentada a evolução histórica dos materiais compósitos nas diversas áreas da engenharia e, posteriormente, é feita a descrição e caracterização dos materiais compósitos de FRP, bem como dos adesivos epoxídicos. Para além disto, faz-se referência aos sistemas de reforço com compósitos, descrevendo as principais técnicas de reforço à flexão com CFRP, os requisitos que estes devem cumprir para desempenharem corretamente as suas funções, modos de rotura e os modelos que procuram caracterizar o comportamento nas interfaces Betão-Adesivo-CFRP. Finalmente, é feita uma síntese dos principais documentos regulamentares e normativos aplicados à temática em estudo.

No **Capítulo 3**, mostram-se os resultados obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados ao longo do programa experimental como é o caso do aço, betão, CFRP e adesivos epoxídicos.

No **Capítulo 4**, será descrito o programa experimental. Os modelos testados são caracterizados, descrevendo geometricamente as vigas e outros parâmetros relativos à concepção das mesmas. Tanto as técnicas de reforço propostas no âmbito desta dissertação como as etapas do respectivo faseamento construtivo são também apresentadas neste capítulo. Para além disso, a descrição das etapas seguidas na betonagem e os procedimentos de montagem do sistema de ensaio são também pontos importantes deste capítulo. Por fim, é dada ainda importância à instrumentação das vigas em estudo e à descrição dos dois tipos de carregamentos utilizados nos ensaios realizados.

No **Capítulo 5**, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais e posteriormente é feita uma análise pormenorizada dos mesmos, fazendo a comparação entre ambos os sistemas propostos bem como, entre estes e outras técnicas de reforço já estudadas anteriormente.

No **Capítulo 6**, o programa de cálculo desenvolvido é apresentado sendo feita referência às leis constitutivas dos materiais, critérios de rotura, e outros parâmetros adoptados. Os dados obtidos com a construção dos modelos numéricos são ainda apresentados, sendo estes posteriormente analisados e comparados com os dados adquiridos experimentalmente.

No **Capítulo 7**, são enumeradas as conclusões obtidas com o trabalho desenvolvido assim como, possíveis recomendações a seguir em futuros trabalhos de investigação.

É importante referir que no final desta dissertação foi reservado um espaço aos apêndices, nos quais estão presentes não só as peças desenhadas referentes ao posicionamento dos diversos acessórios de instrumentação das vigas, mas também o código do programa de cálculo realizado em MATLAB e outros elementos que a este servem de auxílio.

2. Reforço à flexão de estruturas de betão com CFRP

2.1 Evolução histórica do reforço de estruturas de betão armado com compósitos FRP

Um material compósito é o resultado de uma combinação de pelo menos dois materiais de construção diferentes, com o objectivo de conjugar as melhores propriedades isoladas destes, originando um novo material cujas propriedades e características são ideais para a função que têm que desempenhar aquando da sua aplicação. Desde sempre, houve a tendência por parte do Homem de juntar diferentes materiais, que em conjunto com outros munidos de boas propriedades adesivas, era concretizada a ligação pretendida (barro, resinas vegetais, entre outros)[5]. Segundo arqueólogos que observaram túmulos de tribos pré-históricas do ano 4000 AC, foram encontrados alimentos armazenados em vasos de cerâmica partidos, os quais terão sido reparados com resinas de seiva das árvores[6]. Já nas antigas construções de pedra e madeira das civilizações gregas e romanas, eram utilizadas misturas adesivas com argila para o fabrico de tijolos, melhorando assim o seu desempenho estrutural. São de facto estes registos, e tantos outros, que evidenciam o facto dos materiais compósitos terem acompanhado a evolução da humanidade desde os seus primórdios [5, 7].

Foi no início do séc. XX que se desenvolveu uma melhor compreensão do funcionamento e das características do betão, e portanto, este passou a desempenhar um importante papel como material de construção. Juntando a alteração das ações atuantes nas estruturas, causadas pelo aumento substancial do tráfego na primeira metade do séc. XX, à questão do desconhecimento acerca do comportamento do betão armado, surgiu então a necessidade de reforçar as estruturas concebidas com este material [3].

A década de 1930 ficou marcada pela primeira utilização de adesivos epoxídicos na Alemanha, EUA e Suíça. Na mesma altura, no casco de um barco, começavam a surgir as primeiras aplicações de materiais poliméricos reforçados com fibras [6, 7].

É na década de 1940 que a engenharia espacial e aeronáutica surgem como os principais sectores interessados pela utilização de compósitos de FRP [8]. Novas técnicas de aplicação de materiais compósitos, como fibras de vidro embebidas em poliéster em cascos de navios ou em coberturas de radares, surgem nas indústrias de defesa naval e aeroespacial, principalmente devido às suas

características de elevada resistência a ambientes agressivos, bom comportamento térmico ou à sua leveza [7].

Em 1954, Brandt Goldsworthy referiu que é possível utilizar materiais compósitos de FRP no reforço de betão e em todos os tipos de elementos estruturais que estão sujeitos a ações corrosivas derivadas do meio onde se encontram [9]. Ainda durante a década de 1950 as resinas epoxídicas começavam-se a comercializar para a indústria da construção e poucos anos depois já se escrevia sobre as diversas aplicações destas na reparação de elementos estruturais de vias de comunicação ou fendas de estacas e vigas [6].

No que diz respeito à aplicação dos compósitos de fibra de vidro na construção civil, é no período compreendido entre as décadas de 1950 e 1970 que são realizados dois importantes projetos, nos quais aqueles compósitos desempenham as suas funções como revestimentos de fachada. Estes projetos foram denominados “Monsanto House of the Future” (Figura 2.1) e “American Pavillion in Brussels” (Figura 2.2) [5].

Na década de 1960 as fibras de carbono começavam a ser comercializadas, surgindo com a designação de “materiais compósitos avançados”, principalmente devido ao seu elevado módulo de elasticidade e à sua elevada resistência. Nesta altura, devido ao seu elevado custo comercial, apenas a indústria aeroespacial e a aviação militar usufruíam destes materiais [5].

O fabrico e respectiva comercialização dos materiais compósitos foram alargados a outros campos de aplicação no decorrer da década de 70. Devido a este facto, a indústria automóvel consolidava o seu papel de principal consumidora de compósitos [5]. É nesta altura que, Universidades, instituições de pesquisa e empresas industriais são envolvidas, tanto em investigações acerca das propriedades do FRP e sua concepção, bem como em ensaios de estruturas fabricadas a partir de compósitos de fibra/polímeros[10].

Em 1984 começavam a ser testadas, em centros de investigação, técnicas de colagem de armaduras não metálicas em CFRP ou GFRP. Ainda durante esta década é executado pela primeira vez um reforço através da colagem de laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) com uma resina epoxídicas na ponte suíça “Ibach Bridge” (Figura 2.3) [1].



Figura 2.1: *Monsanto House of the Future* [11]



Figura 2.2: *American Pavillion in Brussels* [12]



Figura 2.3: *Ibach Bridge* [13]

Na transição da década de 1980 para a década de 1990, os processos de fabrico, como a pultrusão, sofrem uma enorme evolução surgindo paralelamente, no mesmo período, campanhas de desenvolvimento de projetos-piloto apoiados pela indústria e organizações governamentais [5]. Ainda nesta fase, cresce bastante o interesse no uso de varões de FRP e já na década de 1990 alguns fabricantes estudavam soluções de barras de CFRP enroladas de forma helicoidal e revestidas com areia ao longo da sua superfície [9].

Só em meados da década de 1990 os engenheiros e arquitetos começaram a utilizar com maior frequência compósitos de FRP nos seus projetos, mesmo sem formação especializada ou adequado conhecimento do seu funcionamento como material de construção [9]. O sistema de mantas e tecidos de FRP desenvolvidos nos finais da década de 1980 pelos Japoneses foi finalmente aplicado pela primeira vez em 1992, numa ponte em Tokyo e, posteriormente a esta data, estes passaram a ser utilizados no reforço sísmico, à flexão e ao corte através do confinamento total ou parcial de pilares, paredes ou vigas de edifícios e pontes de betão armado ou pré-esforçado [1].

Desde o início da primeira década do século XXI até aos dias de hoje, muito se tem investido no estudo e desenvolvimento, tanto de novas técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP, como também em novos formatos destes materiais. Hoje em dia temos à disposição no mercado, compósitos de CFRP em forma de varões ou barras, laminados, mantas ou mesmo cabos de pré-esforço.

2.2 Materiais compósitos FRP

Um material compósito é definido como um material composto por dois ou mais materiais, os quais são misturados aquando do seu fabrico para que as características de cada um se complementem de forma a tirar partido de propriedades e características que cada um isoladamente não possui.

Hoje em dia os compósitos de FRP constituem um importante material de construção devido à sua elevada resistência e rigidez, baixo peso específico e excelente resistência aos efeitos negativos dos

agentes ambientais. Em geral, estes materiais são compostos principalmente por uma matriz polimérica reforçada com fibras, bem como pelos materiais de enchimento inorgânicos designados frequentemente na literatura internacional por “*fillers*”. É habitual a utilização de certos constituintes secundários, nomeadamente aditivos cuja finalidade é melhorar ou incrementar certas propriedades ao material compósito pretendido[14, 15].

No que diz respeito à concepção e fabrico dos materiais compósitos de FRP, estes podem ser divididos em pré-fabricados (Figura 2.4) ou impregnados “*in situ*” (Figura 2.5).



Figura 2.4: Reforço de viga com laminados de CFRP



Figura 2.5: Reforço de viga com tecido de CFRP [16]

Os laminados de FRP consistem na sobreposição e impregnação de diversas camadas de fibras, consolidadas posteriormente através de um processo de pultrusão com controlo de espessura e largura do compósito. Hoje em dia, os compósitos de FRP pré-fabricados comercializam-se em forma de mantas (Figura 2.6 a), laminados (Figura 2.6 b), barras e varões (Figura 2.6 c) [3, 17].

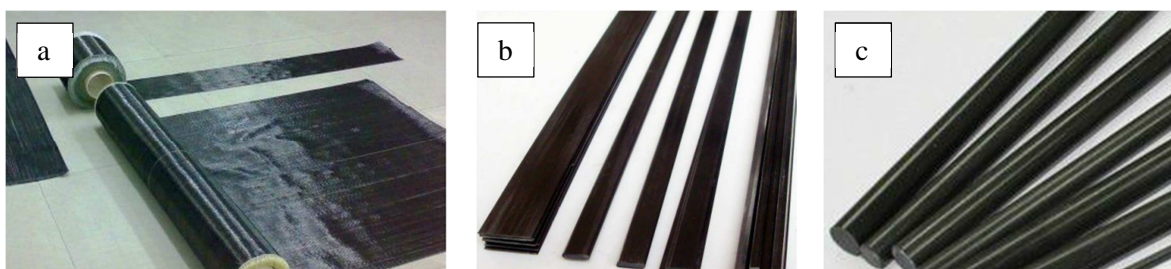


Figura 2.6: Vários tipos de compósitos FRP pré-fabricados [18]

Os sistemas impregnados “*in situ*” baseiam-se na aplicação de feixes de fibras contínuas em forma de fios, mantas ou tecidos sobre um adesivo epoxídico previamente espalhado sobre a superfície a reforçar. Este adesivo é responsável por impregnar o material fibroso, para que desta forma, se proporcione a polimerização do conjunto num compósito de FRP e a aderência na ligação deste com o elemento estrutural [3, 17].

2.2.1 Matrizes epoxídicas

As matrizes epoxídicas consistem numa cadeia de moléculas de grandes dimensões, conhecidas como macromoléculas, cujos átomos são ligados covalentemente, e são caracterizadas por serem de natureza dúctil [9].

Para além de também fornecerem determinadas propriedades desejáveis ao produto compósito final, as matrizes epoxídicas têm a finalidade de aglutinar as fibras de reforço, oferecer proteção ao conjunto contra agressões físicas e químicas que atuam no meio, transmitir e distribuir os esforços entre as fibras. Para isso as matrizes devem ser química e termicamente compatíveis com os materiais fibrosos [14, 15].

A componente mais importante das matrizes são as resinas, às quais podem ser adicionados os materiais de enchimento e os aditivos. Estas podem ser de dois tipos distintos, resinas termoplásticas ou resinas termoendurecíveis.

As resinas termoplásticas apresentam características plásticas quando aquecidas e quando arrefecidas passam a ser rígidas apresentando uma estrutura molecular disposta de forma linear. As vantagens destas resinas residem no baixo custo da técnica de pré-impregnação, na facilidade de armazenagem, apresentando melhor tenacidade, bem como maior deformação na rotura que as resinas termoendurecíveis. Por outro lado, apresentam um elevado grau de viscosidade, o que dificulta o seu fabrico [3, 9, 15]. As resinas termoplásticas mais utilizadas nos dias de hoje são o polietileno, polipropileno, poliamída e o polibutileno [5].

As resinas termoendurecíveis são as mais utilizadas e de aplicação mais generalizada, cujas propriedades se apresentam na Tabela 2.1. Estas resultam de um processo de cura, cujas reações de polimerização originam uma rede molecular tridimensional complexa, rígida e resistente ao calor [5, 15]. As vantagens da utilização deste tipo de material dizem respeito à resistência aos agentes químicos, reduzida fluência e perda de tensões por relaxação, boa estabilidade face a ações sísmicas e maior facilidade de manuseamento e impregnação das fibras. Uma das principais desvantagens deste tipo de resinas diz respeito ao facto não serem recicláveis nem reprocessáveis, não havendo por isso a possibilidade de tomarem outras formas diferentes quando reaquecidas após a sua cura. As resinas mais comuns são as epoxídicas, poliéster e viniléster [3, 9, 15].

Propriedades	Epoxídicas	Poliéster	Viniléster
Resistência à tração (MPa)	55 - 130	20 – 100	68 – 90
Módulo de elasticidade (GPa)	2 - 4	2 – 4,1	3,5 – 5,2
Extensão na rotura (%)	1-9	1 – 6	3 – 5,2
Massa volúmica (g/cm ³)	1,2 - 1,3	1,2 – 1,3	1,12 – 1,16

Tabela 2.1: Propriedades das resinas termoentrecíveis [adaptado de 5]

2.2.2 Fibras

As fibras são filamentos de pequeno diâmetro (5 a 20 μm) e de configuração contínua que, funcionando como reforço da matriz, recebem os esforços provenientes desta e são responsáveis pela resistência e rigidez do compósito. Ao contrário do que se verifica nos metais, estas comportam-se de forma elástica, não apresentando tensão de cedência nem deformações de carácter plástico [15]. No que diz respeito à quantidade de fibra num laminado de FRP, estas ocupam cerca de 35-70% do material compósito, dependendo esse valor de factores como o tipo de materiais utilizados ou o processo de produção do laminado [14].

Importantes características das fibras nos compósitos, como a rigidez, tenacidade ou resistência, são variáveis consoante o tipo, tamanho, grau de concentração e disposição das mesmas na matriz. Sendo a resistência à tração e o módulo de elasticidade máximos segundo a direção principal das fibras, aquelas características tendem a diminuir quando o ângulo em análise se afasta daquela direção, tomando valores mínimos perpendicularmente à mesma [15, 17].

Os reduzidos valores de massa volúmica para elevados valores de resistência mecânica ou mesmo a resistência ao fogo e a não susceptibilidade de corrosão que as fibras demonstram, fazem parte de vantagens que estas possuem e que são responsáveis pelo seu sucesso na engenharia atual. Devido ao seu comportamento típico elástico e linear, como descrito anteriormente, as fibras apresentam roturas de carácter frágil, inconveniente que não é de todo favorável no que diz respeito à sua aplicação como reforço estrutural [15, 17].

As fibras de vidro, de carbono e aramida, são os principais tipos de fibras utilizadas hoje em dia em aplicações de Engenharia Civil. Visto que o assunto desenvolvido neste trabalho diz respeito ao reforço com fibras de carbono, apenas estas serão apresentadas com maior detalhe.

2.2.2.1 Fibras de carbono

As fibras de carbono começaram a ser desenvolvidas na Grã-Bretanha e são consideradas materiais orgânicos, semi-cristalinos e isotrópicos devido à sua composição molecular [9, 14]. Estes filamentos produzidos com diâmetros na ordem dos 5 a 10 μm (Figura 2.7), são de cor preta, com uma textura radial na zona central da sua secção transversal e orientação circular em zonas superficiais da mesma (Figura 2.8) [9, 17].

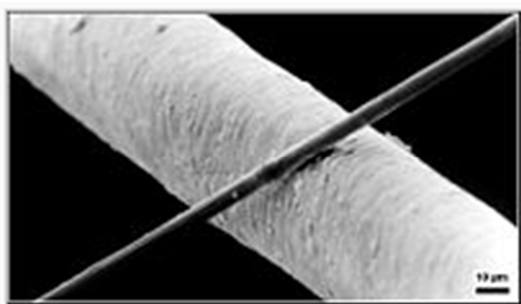


Figura 2.7: Filamento de fibra de carbono de 6 μm (a preto) e um fio de cabelo humano (a branco)

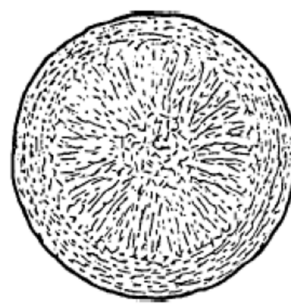


Figura 2.8: Secção transversal de um filamento de fibra de carbono [17]

[19]

As fibras de carbono são resultado de um processo de tratamento químico com base em precursores orgânicos ricos em carbono (poliacrilonitrilo, *rayon*, etc..) [5, 9]. De acordo com o tipo de precursor utilizado no fabrico das fibras de carbono, estas podem ser classificadas como sendo do tipo I, cujo seu módulo de elasticidade é considerado elevado (HM - *high modulus* e UHM - *ultra high modulus*), ou do tipo II com valores de resistência acima do habitual (HS - *high strength* e UHS - *ultra high strength*) [15, 20].

No que diz respeito ao fabrico das fibras de carbono, estas passam por diversas etapas. Primeiro procede-se ao aquecimento das fibras ao ar, geralmente alcançando os 300°C, com o objectivo de estabilizar o precursor que controla a fusão e, posteriormente, no sentido de eliminar elementos de natureza carbónea, procede-se à carbonização numa atmosfera inerte a temperaturas que podem ir desde os 350 aos 1600°C. Finalmente, através da utilização de outro tipo de tratamento térmico (2000°C a 3000°C), é formada uma microestrutura neste material capaz de lhe fornecer boas características de resistência e rigidez [15].

São inúmeras as vantagens que as fibras de carbono possuem. Para além das vantagens comuns entre todos os tipos de fibras, já mencionadas anteriormente, as fibras de carbono apresentam inúmeras características físicas e mecânicas que permitem o seu fabrico para variadíssimas aplicações. Estas possuem reduzida sensibilidade à fadiga e fluência e, à temperatura ambiente não são afectadas pela humidade nem pela ação de ácidos ou bases. Os elevados valores de tensão última e módulo de elasticidade inerentes a um reduzido peso próprio ou mesmo um reduzido

coeficiente de dilatação térmica tanto ao longo do seu desenvolvimento longitudinal como transversalmente, fazem das fibras de carbono um material de eleição em variadíssimas áreas da engenharia [5, 15].

Para além das vantagens mencionadas, as fibras de carbono possuem alguns inconvenientes que importam referir. Para além do seu modo de rotura frágil e do seu valor comercial elevado em comparação com outros materiais de reforço, estas possuem reduzida resistência a ações de impacto [5, 15].

A Tabela 2.2 descreve algumas propriedades referentes a cada tipo de fibras de carbono.

Tipo de fibra de carbono	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de Tração (MPa)	Extensão última (%)
<i>High strength</i>	215 – 235	3500 – 4800	1,4 – 2
<i>Ultra High strength</i>	215 – 235	3500 – 6000	1,5 – 2,3
<i>High Modulus</i>	350 – 500	2500 – 3100	0,5 – 0,9
<i>Ultra High Modulus</i>	500 - 700	2100 - 2400	0,2 – 0,4

Tabela 2.2: Propriedades típicas da fibra de carbono [adaptado 20]

2.2.3 Aditivos

Atualmente, no fabrico dos materiais compósitos de FRP é comum a utilização de diversos aditivos que visam, não só o melhoramento das características e propriedades da matriz, mas também o melhoramento das condições de fabrico e processamento do material compósito.

De entre os aditivos utilizados atualmente salientam-se os corantes (alterações da cor do compósito de FRP), estabilizadores de ultravioletas (perda de brilho, descoloração, desidratação), precursores de espumas (diminuição da massa volúmica), agentes anti-estáticos (diminuição da tendência de atração de carga eléctrica), antioxidantes (atraso ou impedimento da oxidação dos polímeros), certos elastómeros como elementos de borracha (incremento de dureza), partículas metálicas (aumento da condutibilidade eléctrica), catalisadores ou aceleradores (garantem uma cura homogénea), etc. Para além destes, existem outros aditivos que procuram melhorar outras propriedades, por vezes necessárias, dos compósitos de FRP, nomeadamente, diminuição da retração, diminuição do teor de vazios, ajuste da matriz às condições ambientais [5, 15, 17].

2.2.4 Cargas de enchimento

As cargas de enchimento (carbonato de cálcio, caulino, alumina ou sulfato de cálcio) têm geralmente, na literatura internacional, a designação de “*fillers*” e consideram-se produtos quimicamente inertes, sendo acrescentados à constituição dos materiais compósitos de FRP em

proporções que rondam os 20% em relação ao peso total do mesmo. Estes componentes beneficiam o comportamento dos compósitos FRP na medida em que aumentam a rigidez e melhoram o comportamento térmico do material, melhoram a resistência ao desgaste, reduzem os efeitos de retração na cura da matriz, diminuem o conteúdo orgânico, ou seja, reduzem a inflamabilidade, previnem o desenvolvimento de fissuras em zonas de descontinuidade com teor excessivo de resinas, e fornecem outras propriedades importantes como dureza, resistência à fadiga e à fluência ou resistência química [15, 17].

2.3 Adesivos epoxídicos

Num sistema de reforço com compósitos, é de extrema importância a escolha de um adequado agente responsável pela colagem do elemento de reforço ao material a reforçar. Este agente, designado por adesivo epoxídico, consiste num material de natureza polimérica, cuja sua finalidade se prende com a contribuição para a correta ação conjunta entre dois materiais que formam o sistema de reforço com compósitos através da sua colagem, permitindo assim a respectiva transferência de tensões entre eles [17, 20]. Esta transferência de tensões, desenvolve-se nas zonas de interface betão – adesivo – material de reforço, através da ocorrência de tensões de corte, bem como tensões normais à referida interface [17, 21].

Para que a transferência de tensões, desenvolvidas nas zonas de interface betão – adesivo – material de reforço, se faça com sucesso é importante que o próprio adesivo respeite algumas exigências referentes à temperatura de transição vítrea, módulo de elasticidade, resistência ao corte e tração, entre outras. Refira-se que todos estes requisitos são desenvolvidos com maior detalhe mais adiante.

As propriedades dos diversos tipos de adesivos existentes nos dias de hoje, variam consoante as suas características físico-químicas e mecânicas. No entanto, estas propriedades podem ser alteradas quando a escolha dos adesivos não é adequada às condições ambientais envolventes. Assim, na presença de humidade, o adesivo pode plasticizar com consequente diminuição da temperatura de transição vítrea e, portanto, diminuição de certas propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade ou a resistência à tração. Por outro lado, quando se verificam variações bruscas de temperatura, ou quando estas se mantêm elevadas durante longos períodos de tempo, o desempenho dos adesivos também corre o risco de não corresponder ao esperado. Comprovando-se diferentes capacidades de expansão térmica dos materiais envolvidos no sistema de reforço com FRP, é também provável que o comportamento das ligações betão – adesivo – material de reforço seja posto em causa, provocando em situações extremas, o seu desacoplamento [4].

De entre os adesivos epoxídicos existentes, o mais utilizado resulta da mistura entre uma resina epoxídica (polímero) com um endurecedor. A este conjunto podem ou não ser adicionados cargas de enchimento (*fillers*), componentes com funções de amaciador do adesivo, aditivos de endurecimento, etc [3, 20]. Consoante o sistema de reforço a utilizar, existem, contudo, diferenças no que diz respeito ao tipo e aplicação do adesivo. Assim, no caso de sistemas de reforço com compósitos pré-fabricados, o agente adesivo é um material distinto do compósito de FRP, sendo este o resultado da mistura entre dois componentes, a resina tipo epóxido e um endurecedor [17]. No caso de sistemas de FRP curados “in situ”, o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras e da respectiva polimerização em compósito de FRP, cuja responsabilidade passa pela colaboração de uma adequada transferência de esforços entre as fibras ou entre elas e a superfície colada [17].

A Tabela 2.3, representa as propriedades típicas de adesivos epoxídicos utilizados atualmente.

Propriedades (a 20°C)	Adesivo epoxídico
Densidade (kg/m ³)	1100 – 1700
Módulo de elasticidade (GPa)	0,5 – 20
Coefficiente de Poisson	0,3 – 0,4
Resistência à tração (MPa)	9 – 30
Resistência ao corte (MPa)	10 – 30
Tensão de compressão (MPa)	55 – 110
Extensão de rotura (%)	0,5 – 5
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	25 – 100
Temperatura de transição vítrea (°C)	45 – 80

Tabela 2.3: Propriedades típicas dos adesivos epoxídicos [20]

2.4 Sistemas de reforço com compósitos de CFRP

2.4.1 Técnicas de reforço de vigas à flexão

Como já foi mencionado, devido ao crescente interesse no uso de materiais compósitos de FRP na década de 1980, foi já no início da década de 1990 que o conceito de reforço de estruturas com este material foi introduzido. Em 1991, no *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (EMPA), Meier e Kaiser realizaram uma campanha de ensaios experimentais a vigas de betão armado com o objectivo de estudar técnicas de reforço através da colagem superficial de compósitos de fibras de carbono. Esta investigação, que foi bastante importante para o desenvolvimento da técnica designada de *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), teve como objectivos a avaliação do incremento de resistência conferido pelo reforço, bem como a observação dos respectivos modos de rotura obtidos com esta técnica [22-24].

Contudo, os trabalhos de investigação e estudos realizados ao longo das últimas duas décadas, acerca da técnica EBR permitiram concluir que esta apresenta alguns inconvenientes que se prendem não só com a vulnerabilidade a roturas prematuras, como também com a exposição aos agentes externos a que o compósito de FRP está sujeito. Devido a este facto, a comunidade científica tem realizado diversas tentativas no sentido de superar os inconvenientes verificados, conseguindo arranjar alternativas que posteriormente dão origem a novas técnicas de reforço. Técnicas como a *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSMR) ou mesmo a *Mechanically Fastened* (MF-FRP) surgem hoje à disposição dos engenheiros de estruturas com o intuito de fazer face às desvantagens existentes nas técnicas pioneiras [25-27]. De seguida, são apresentadas as principais técnicas existentes para reforço de vigas à flexão com compósitos de FRP.

2.4.1.1 Sistemas de impregnação *in situ*

O reforço através de sistemas de impregnação *in situ* de compósitos de FRP baseiam-se na aplicação de feixes de fibras contínuas, em forma de fios unidireccionais (mantas e tecidos) ou bidireccionais (tecidos) em estado seco ou pré-impregnados, sobre um adesivo epoxídico previamente aplicado na superfície plana ou curva a reforçar [17, 28].

As principais vantagens deste tipo de reforço são a espessura final inferior à espessura obtida noutros sistemas (0,1-0,5mm), eficácia no reforço de estruturas vulneráveis à ação sísmica devido à ductilidade e resistência ao corte que incrementa e a fácil adaptação à geometria dos elementos a reforçar essencialmente pelas suas características flexíveis. No entanto, os inconvenientes que residem nos sistemas de impregnação *in situ* dizem respeito à fragilidade que apresentam e à respectiva concentração de tensões quando são aplicados em elementos com arestas vivas, dando origem muitas vezes a roturas prematuras. Outra desvantagem importante prende-se com o menor controlo de qualidade, já que após a sua aplicação as fibras podem não ficar devidamente alinhadas, alterando desta forma as propriedades do compósito de FRP [17, 28].

No que diz respeito à sua aplicação, este sistema pode ser utilizado no reforço de vigas com o objectivo de corrigir deficiências e fragilidades perante ações de corte ou flexão, ou no reforço de pilares de secção circular ou outras, desde que se proceda ao arredondamento das arestas existentes. Dadas as suas características flexíveis já mencionadas, trata-se também de uma boa solução para ligações de irregularidade geométrica acentuada [3].

Em geral, o processo de execução deste tipo de sistema segue as seguintes etapas [28]:

- i. Esmerilamento das superfícies e arredondamento das arestas;
- ii. Aplicação do primário (geralmente é um material epoxídico de baixa viscosidade) em toda a superfície do elemento;
- iii. Aplicação da primeira camada de resina com o objectivo de iniciar a saturação das fibras de carbono;
- iv. Aplicação do tecido ou manta de fibra de carbono;
- v. Aplicação de uma segunda camada de resina. Repetição de iv),v), e vi) consoante o número de camadas aplicadas;
- vi. Aplicação da camada de proteção da fibra.



Figura 2.9: Aplicações de sistemas impregnados in situ [29, 30]

2.4.1.2 EBR - Externally Bonded Reinforcement

A técnica de reforço designada por *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), consiste na colagem de materiais compósitos pré-fabricados, em forma de laminados ou mantas unidireccionais, ao longo das faces tensionadas do elemento que se pretende reforçar, através de um adesivo epoxídico aplicado previamente. Os elementos de reforço são disponibilizados em rolos de 50 ou 100m com espessuras equivalentes a 1-2mm e larguras variáveis, consoante o tipo de reforço necessário.

O sistema EBR com compósitos de FRP foi desenvolvido com o intuito de fazer face a certos inconvenientes característicos da colagem de chapas metálicas (corrosão, peso das chapas, etc), tratando-se de uma técnica bastante simples de aplicar. Refira-se ainda que uma vantagem típica deste sistema diz respeito ao reduzido número de cuidados prévios a ter em conta antes da aplicação do reforço. Contudo, com esta técnica são frequentemente detectadas roturas prematuras, razão pela qual a resistência à tração dos laminados de FRP dificilmente se mobiliza totalmente.

Contudo, no reforço à flexão de vigas em betão armado, esta técnica não mobiliza totalmente a resistência à tração dos compósitos de FRP devido à sua susceptibilidade de sofrer roturas prematuras. Outro aspecto negativo diz respeito à exposição exterior a que os elementos de reforço

estão sujeitos, na medida em que as suas propriedades facilmente se alteram devido ao efeito dos ciclos gelo/degelo, elevadas variações de temperatura, exposição ao fogo ou mesmo a atos de vandalismo [3, 25].

O processo de colagem externa do material de reforço envolve as seguintes etapas [26]:

- i. Preparação da superfície do elemento a reforçar com o objectivo de melhorar as condições de aderência (preferencialmente com jacto de areia no caso de aplicação de laminados);
- ii. Aplicação do adesivo epoxídico;
- iii. Colagem do material de reforço;

É importante referir que antes, durante e após o procedimento mencionado anteriormente, é necessário realizar um controlo de qualidade técnica do sistema de reforço, evitando os riscos associados a uma deficiente aplicação do material FRP. De entre muitas possíveis, as principais medidas a tomar são as seguintes [26]:

- i. Devem ser realizados ensaios de tração direta de “*pull-off*”;
- ii. As irregularidades da superfície a reforçar devem ser regularizadas previamente;
- iii. A superfície do betão deve permanecer limpa, seca e isenta de gorduras e óleos;
- iv. A mistura da resina e endurecedor e respectivas dosagens devem seguir as exigências do fabricante e respectivas especificações técnicas;
- v. Deve ser respeitado o tempo prático de utilização (“*pot-life*”) das resinas e adesivos;
- vi. Através de pancadas suaves, deve-se verificar que não existem espaços vazios entre o material de reforço e o adesivo epoxídico;
- vii. Após a colocação do reforço, este deve ser pintado de forma a proteger a matriz da ação dos raios ultravioletas.

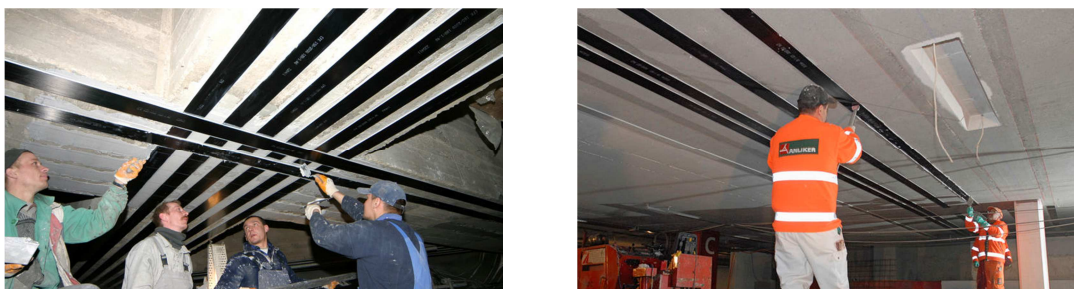


Figura 2.10: Aplicação de laminados de CFRP [31]

2.4.1.3 NSMR - Near Surface Mounted Reinforcement

Devido aos inconvenientes demonstrados pela técnica EBR, os investigadores procuraram desenvolver novas técnicas que corrigissem essas lacunas. Baseado em técnicas já aplicadas desde

os finais da década de 1940 em que eram introduzidos varões de aço ao longo do betão de recobrimento, surge então o sistema *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSMR) [32, 33]. A técnica consiste na colagem dos elementos de reforço no interior de rasgos (3-5 mm de largura e 12-15mm de profundidade) executados previamente, essencialmente através de adesivos epoxídicos. Em regra, a função de reforço é atribuída a materiais compósitos de FRP em forma de laminado (Figura 2.11), barras ou varões lisos ou nervurados (Figura 2.12) [32-35].

A evolução da técnica aplicada desde os finais dos anos 40 do século passado para a técnica NSMR beneficia, como já foi referido, do facto dos varões de aço utilizados serem substituídos por materiais compósitos, na medida em que estes apresentam um maior valor de relação resistência à tração/peso específico. Devido à inexistência de fenómenos de corrosão, bem como ao facto de se verificar um melhoramento das soluções em termos de durabilidade, a utilização de elementos de FRP faz com que seja possível executar os rasgos de menores dimensões no recobrimento do betão, facilitando a instalação dos elementos de FRP, melhorando a economia da técnica e diminuindo o risco de interferência com as armaduras ordinárias [26].

A melhor protecção à ação dos agentes externos (referidos na técnica EBR) e a possibilidade de mobilizar uma maior percentagem da resistência total à tração do material de reforço, são aspectos favoráveis desta técnica em relação ao sistema EBR. Outras mais-valias da técnica NSMR são a simplicidade e eficiência do processo de aplicação ou mesmo o facto de ser possível proceder a intervenções cujo impacto estético é quase nulo. Contudo, apesar do enorme interesse dedicado pela comunidade científica nos dias de hoje à técnica NSMR, verifica-se ainda que esta carece de documentos regulamentares específicos [32-35].

As vantagens que foram mencionadas anteriormente, fazem desta técnica uma alternativa viável e em muitos casos mais eficaz que a técnica EBR com compósitos FRP.

De forma a aplicar corretamente este tipo de reforço é necessário seguir as seguintes etapas [26]:

- i. Execução dos rasgos ao longo da superfície do elemento de betão a reforçar;
- ii. Com a ajuda de uma pistola de ar comprimido, proceder à limpeza dos rasgos e das respectivas zonas envolventes do elemento;
- iii. Corte do laminado de FRP de acordo com as dimensões pretendidas e limpeza com acetona do material de reforço FRP;
- iv. Aplicação do adesivo epoxídico de acordo com as recomendações do fabricante;
- v. Preenchimento do rasgo com o adesivo epoxídico;
- vi. Aplicação do adesivo epoxídico ao longo das faces do material de reforço;
- vii. Introdução do material de reforço no rasgo, retirando de seguida o excesso de adesivo epoxídico.

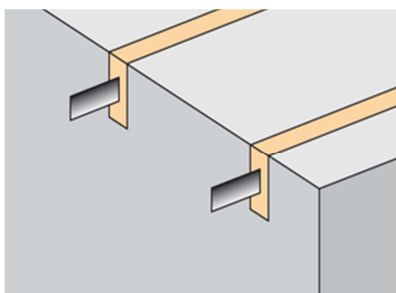


Figura 2.11: Laminados de CFRP na técnica NSMR [36]

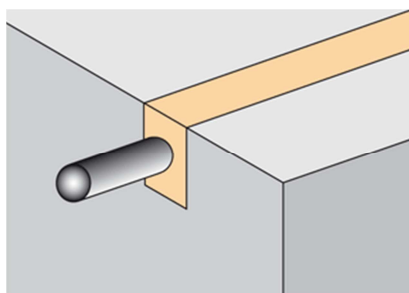


Figura 2.12: Varões de CFRP na técnica NSMR [36]



Figura 2.13: Aplicação da técnica NSMR [adaptado de 5]

2.4.1.4 MF-FRP - Mechanically Fastened

A técnica *Mechanically Fastened* (MF-FRP) (Figura 2.14), cuja sua génese é também associada ao reforço através da colagem de chapas metálicas à superfície do elemento a reforçar, começou a ser verdadeiramente estudada na transição do século XX para o século XXI na Universidade de Wisconsin [37, 38]. Ao longo da última década a comunidade científica tem realizado diversos trabalhos de investigação com esta técnica, publicando-os em inúmeras revistas científicas, revelando-se hoje em dia um sistema de reforço eficiente quando aplicado em estruturas de betão, madeira ou alvenaria. Esta técnica baseia-se na fixação de laminados multidireccionais de FRP (Figura 2.15) ao elemento estrutural a reforçar, através de parafusos metálicos próprios para o efeito. Estes parafusos são fixados ao longo do elemento com um comprimento mínimo de embebimento equivalente a 25mm e um espaçamento relativamente reduzido (45-150mm longitudinalmente e 25mm transversalmente). Com o objectivo de minimizar os riscos que dizem respeito à ocorrência de roturas prematuras, são colocadas nas extremidades do laminado FRP ancoragens mecânicas [38-40].

No que diz respeito às suas vantagens, esta técnica revela-se de rápida instalação, através de ferramentas manuais simples e materiais relativamente leves, necessitando de reduzida ou nenhuma mão-de-obra especializada. A superfície do elemento estrutural a reforçar não necessita de ser previamente preparada e a estrutura reforçada pode ser carregada logo após a aplicação do sistema de reforço. As reduzidas dimensões dos fixadores utilizados permitem uma melhor uniformidade no que diz respeito à distribuição de cargas ao longo do laminado de reforço, reduzindo também eventuais concentrações de tensões causadoras de roturas prematuras. Outra mais-valia verificada pelos investigadores, tem a ver com a melhor ductilidade que este tipo de reforço oferece ao sistema estrutural, quando comparado com outras técnicas de reforço habitualmente utilizadas. É, no entanto, de notar que a ocorrência de fissuras provocadas pelo impacto da fixação dos parafusos metálicos no elemento estrutural de betão ou mesmo a menor eficácia na transferência de tensões entre o FRP e o betão devido ao facto dos pontos de fixação serem discretos, preenchem o lote de

aspectos mais desfavoráveis inerentes à utilização desta técnica como reforço de estruturas [25, 37, 39].

As etapas do procedimento da técnica de reforço MF-FRP são as seguintes [40]:

- i. Corte do material de reforço com as dimensões pretendidas e respectiva marcação dos pontos de fixação;
- ii. Marcação dos locais onde serão executados os furos no elemento estrutural;
- iii. Execução dos furos no laminado com uma broca rotativa;
- iv. Execução dos furos no elemento estrutural com uma profundidade ligeiramente superior à profundidade de embebimento;
- v. Limpeza do laminado e do elemento estrutural com o objectivo de remover todos os detritos provenientes da operação de furação;
- vi. Posicionamento do laminado no elemento estrutural;
- vii. Colocação e aperto dos parafusos metálicos de fixação do laminado de reforço.



Figura 2.14: Elementos estruturais reforçados com a técnica MF-FRP [40, 41]

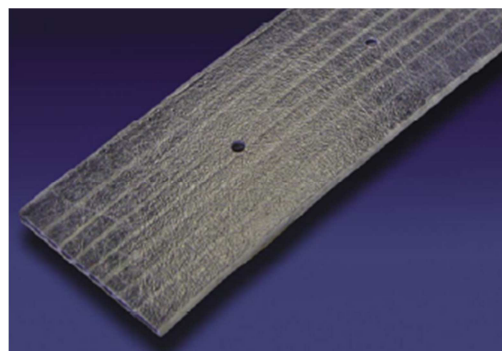


Figura 2.15: Laminado FRP utilizado na técnica MF-FRP [40]

2.4.2 Requisitos de desempenho para os sistemas de reforço com CFRP

2.4.2.1 Compatibilidade entre os materiais constituintes

A compatibilidade entre os materiais de reforço, o betão e os adesivos utilizados é uma condição necessária para um correto desempenho do sistema de reforço adoptado. Esta é conseguida quando as dimensões ou propriedades físicas, químicas e eletroquímicas dos materiais constituintes do sistema de reforço se encontram em sintonia, evitando assim problemas associados a variações de volume ou efeitos químicos e eletroquímicos, levando ao desgaste e deterioração num período de tempo inferior ao esperado [42]. Autores como Morgan [42], Wiberg [43] ou Emmons [44], distinguem quatro vertentes de compatibilidade entre os materiais. São elas a compatibilidade dimensional, higroscópica ou de permeabilidade, química e eletroquímica.

A capacidade que os materiais apresentam para resistir a variações de volume, sem que ocorra qualquer tipo de anomalia que ponha em causa o adequado funcionamento do sistema de reforço é conseguida através da compatibilidade dimensional. Existem vários factores no desempenho dos materiais que contribuem para a falta de compatibilidade dimensional. Estes dão origem a fenómenos de instabilidade volumétrica, e são exemplos a retração por secagem nos casos em que são utilizados adesivos de base cimentícia, ou mesmo a susceptibilidade que os materiais apresentam para sofrerem dilatações térmicas. Em ambos os casos, na zona do reforço, é frequente surgirem tensões desenvolvidas internamente provocando a fendilhação e posteriormente a deterioração do material FRP. Parâmetros como o módulo de elasticidade e a fluência dos materiais ou a geometria das secções também são importantes na compatibilidade dimensional [42-44].

Outro aspecto importante diz respeito à permeabilidade dos materiais, e portanto à compatibilidade higroscópica. No projeto de reforço devem ser tomadas em consideração as diferenças de permeabilidade dos diferentes materiais. Tendo em conta que o betão considera-se um material permeável, poderá tornar-se prejudicial para o elemento estrutural a utilização de elementos de reforço impermeáveis em locais com muita humidade, levando à ocorrência de problemas de incompatibilidade e à deterioração dos materiais envolvidos devido à constante presença de água [42, 43].

A capacidade que o material de reforço apresenta para proteger a armadura contra fenómenos de corrosão, é um indicador positivo para que a compatibilidade química e eletroquímica entre os materiais se verifique. Por outro lado, as diferenças de pH ou o teor de alcalis e cloretos que se verificam nos materiais constituintes do sistema de reforço, são também parâmetros a ter em consideração na obtenção de uma adequada compatibilidade química entre estes materiais [43].

2.4.2.2 Ao nível do material compósito de FRP

Existem diversos requisitos, tanto ao nível dos materiais fibrosos como da matriz polimérica dos materiais de FRP, que quando são tidos em conta, é possível conseguir o melhor desempenho possível dos mesmos, tirando partido das suas melhores propriedades.

No caso dos materiais fibrosos que constituem o elemento de FRP, um adequado grau de concentração, volume e tamanho dos filamentos de fibras são características que beneficiam o desempenho dos materiais de FRP no que diz respeito à transferência de cargas e à resistência mecânica do sistema de reforço. Assim, considerando um elemento de reforço composto por fibras unidireccionais, a máxima resistência é conseguida para fibras longas, contínuas e de pequeno diâmetro [17].

Do ponto de vista das principais propriedades desejáveis para as matrizes constituintes do material FRP, estas deverão oferecer boas características de condutividade térmica e elétrica, elevada resistência ao fogo e adequadas características de tenacidade à fractura e deve ser sensível à humidade. Do ponto de vista do processo de fabrico, a temperatura atingida aquando do processamento dos compósitos deve ser adequada [17].

Finalmente, para além das características já mencionadas, a mistura dos materiais fibrosos com a matriz polimérica devem formar um material FRP com boa resistência a ações de corrosão, características de deformação na rotura adequadas às necessidades, estabilidade dimensional e resistência à fadiga bem como a ações de carácter químico [21].

2.4.2.3 Ao nível do adesivo

Os materiais responsáveis pela garantia de aderência e colagem do material de reforço ao elemento estrutural a reforçar também devem respeitar certas exigências ao nível das suas propriedades e características.

Soares e Martins [17] referem que Mays et al. distingue os seguintes requisitos ao nível do adesivo:

- i. Deve exibir adesão adequada entre os materiais envolvidos no sistema de reforço;
- ii. Deve possuir uma temperatura de transição vítrea não superior a 40°C;
- iii. O módulo de flexão deve estar compreendido entre 2 e 10MPa (a 20°C);
- iv. Deve possuir resistência ao corte e à tração maior que 12 MPa (a 20°C);
- v. Não ser sensível às características alcalinas do betão.

Segundo Rodrigues [45] estes materiais:

- i. Devem permitir a sua aplicação sem qualquer problema imediatamente após a execução da mistura;
- ii. Devem apresentar características tixotropicas para situações em que uma alta viscosidade é necessária, permitindo um adequado humedecimento durante a sua aplicação;
- iii. Deve ser capaz de curar com a resistência adequada, mesmo que as condições de temperatura e humidade não sejam favoráveis;
- iv. Deve apresentar, durante a cura, uma retração inferior a 0,1%;
- v. Devem possibilitar uma cura para temperaturas superiores a 5°C.

Por outro lado, Kolsh [46] também refere que os adesivos devem possuir propriedades mecânicas ideais para que a transmissão de cargas se processe de forma eficiente. Para além disso, estes materiais devem ser sempre ambientalmente sustentáveis.

Para além do que já foi referido, Matthys [21] afirma ainda que a resistência à humidade e fluência, bem como a resistência às propriedades alcalinas do betão e a compatibilidade térmica para com o mesmo, são factores que devem ser sempre exigidos aos adesivos.

2.4.2.4 Ao nível do betão

Como tem sido referido ao longo deste trabalho, um sistema de reforço que admita a colagem de materiais compósitos de FRP deve assegurar uma adequada transferência de tensões entre o reforço e a estrutura de betão. Esta transferência pode ser garantida pela aderência ao longo das interfaces. Como tal, e para além das exigências necessárias já mencionadas nos restantes materiais, o betão deverá também apresentar os seus requisitos fundamentais para que todo o mecanismo referido funcione da melhor forma.

Assim, é importante que a superfície do betão apresente a maior resistência possível à tração (com valores superiores a 1,5MPa) e ao corte. Para além disto, a superfície do betão deve estar isenta de qualquer sujidade, gordura ou óleo e não deve possuir deficiências pontuais nas zonas onde o reforço será posteriormente aplicado. O betão deve-se apresentar seco e livre de qualquer contaminação [17].

2.4.2.5 Durabilidade dos materiais constituintes

Neste contexto, a durabilidade de uma estrutura de betão reforçado com compósitos de FRP pode ser definida como a capacidade para resistir à fissuração, oxidação, degradação química, delaminação, desgaste, fluência ou fadiga que resultam de ações ambientais, ataques químicos, efeitos físicos ou outros processos de deterioração [4, 47]. A durabilidade apresenta-se, portanto como um ponto crucial na garantia da sustentabilidade de um determinado sistema de reforço com materiais compósitos.

Existem inúmeros factores que facilmente afectam a durabilidade de um sistema de reforço. Tanto a definição dos materiais, como a respectiva compatibilidade entre eles, ou mesmo a definição dos seus métodos de aplicação, são exemplos de critérios associados ao projeto que devem ser tidos em conta com o objectivo de aumentar a vida útil dos materiais. Factores como a adequada preparação

da superfície do elemento a reforçar ou a qualidade da mão-de-obra já na fase de construção, são também essenciais na garantia da durabilidade [42, 44].

Contudo, as ações ambientais provocam alterações nas propriedades físico-químicas do betão, fibras e adesivos, tornando-se por isso bastante importante conhecer os seus mecanismos de desgaste, bem como o impacto a longo prazo que os respectivos agentes de degradação têm no desempenho dos materiais constituintes do sistema de reforço.

O grau de porosidade do betão e os mecanismos de penetração dos agentes agressivos definem a durabilidade do betão de uma estrutura. A humidade ambiental interfere em todos os processos de deterioração do betão, na medida em que a sua capacidade de reter água é superior à capacidade de perder. Por outro lado, as alterações das propriedades físico-químicas e respectiva deterioração do betão, são muitas vezes o resultado do contacto direto com agentes químicos ambientais. O dióxido de carbono provoca a carbonatação do betão, o oxigénio e os cloretos promovem a corrosão das armaduras, os ácidos atacam o cimento, os sulfatos reagem expansivamente com os cimentos e os alcalis podem reagir com os agregados [47]. É portanto, através dos vários mecanismos de transporte (permeação, difusão ou absorção), que tais reações podem desencadear sintomas de degradação no betão, nomeadamente fendilhação, destacamento e desagregação [4].

No que se refere ao material FRP, os seus efeitos são conhecidos atualmente apenas com base em trabalhos experimentais realizados. Fernandes [4], com base nas conclusões obtidas em [48] e [49], refere que a presença de humidade ou de soluções aquosas, o ambiente alcalino, os efeitos térmicos, a fluência e relaxação, a fadiga e a exposição às radiações ultra violetas ou ao fogo, são factores que influenciam fortemente a durabilidade e comportamento a longo prazo das estruturas reforçadas com materiais de FRP.

Os adesivos epoxídicos são vulneráveis às ações higrométricas do ambiente que os rodeia, podendo absorver a humidade, tanto por absorção superficial instantânea, como por difusão [4]. Todas as alterações provocadas pelas ações ambientais neste tipo de agentes de colagem foram já descritas no capítulo correspondente à caracterização dos mesmos.

É portanto necessário ter presente, tanto em fase de projeto como na própria construção, todas as condicionantes referidas anteriormente no sentido de otimizar o desempenho dos materiais, minimizando as fragilidades destes perante as ações ambientais a que a estrutura reforçada vai estar sujeita.

2.4.3 Modos de rotura

É de extrema importância a identificação e compreensão dos modos de rotura de um elemento reforçado com FRP através de uma determinada técnica de reforço, não só para aprofundar o conhecimento da técnica aumentando a sua eficácia em futuras aplicações, como também para desenvolver novos critérios de dimensionamento ou de verificação de segurança.

A Figura 2.16 pretende ilustrar os diversos modos de rotura existentes em vigas de betão armado reforçadas à flexão com compósitos de FRP.

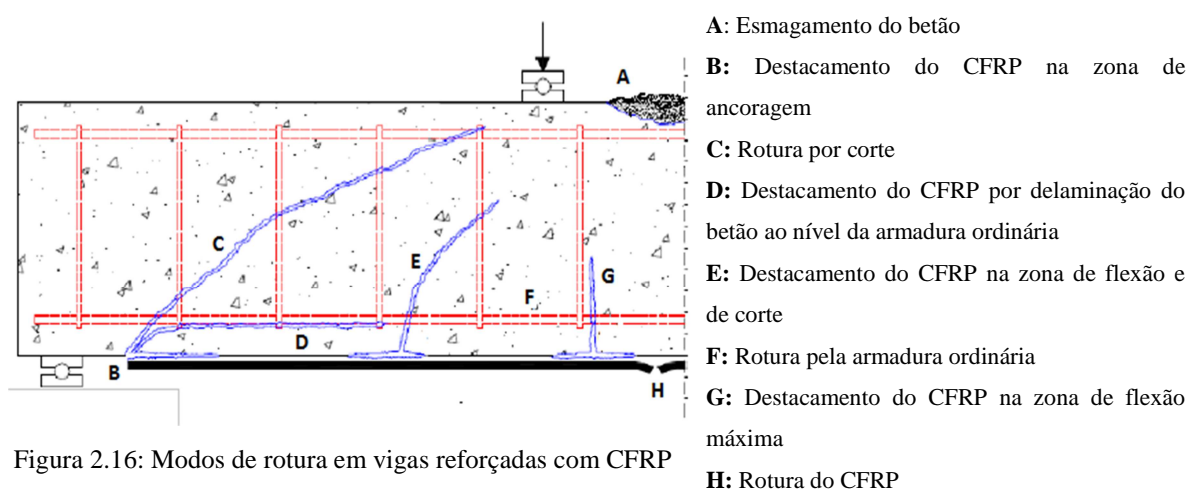


Figura 2.16: Modos de rotura em vigas reforçadas com CFRP

[adaptado 50]

Todos os modos de rotura mencionados podem ser distribuídos por dois grupos principais, também considerados na literatura técnica [50]:

- Aqueles em que todos os componentes do sistema de reforço se mantêm intactos até que se verifiquem fenómenos de esmagamento do betão em zonas de compressão ou a rotura do material de reforço por tração. Estes tipos de rotura podem ser designados de “roturas clássicas” ou “roturas com ação total do compósito de FRP”.
- Aqueles cujas propriedades dos componentes do sistema de reforço não são completamente aproveitadas por variadas razões, nomeadamente, por incorreções na aplicação dos respectivos materiais de reforço ou outras anomalias possíveis de se verificarem ao nível das interfaces de aderência entre o reforço e a superfície de betão. Estas roturas definem-se na literatura técnica como “roturas prematuras” ou “roturas com perda de ação resistente do compósito FRP”.

2.4.3.1 Roturas clássicas

Dependendo das características dos elementos reforçados, das condições de carregamento ou mesmo dos materiais e técnicas de reforço, tanto o *bulletim 14* da FIB [20] como o ACI 440 [51], fazem a distinção dos vários tipos de roturas que surgem quando um dos materiais consegue alcançar a respectiva tensão limite sem que antes se verifiquem anomalias ou danos no mesmo.

Assim de acordo com o *bulletim 14* da FIB [20] e com o ACI 440 [51], as roturas clássicas, que podem ser definidas como “roturas com ação total do compósito de FRP”, podem ser enumeradas da seguinte forma:

- i. Plastificação da armadura ordinária seguida de esmagamento do betão devido a reduzidas taxas de armadura (Figura 2.17);

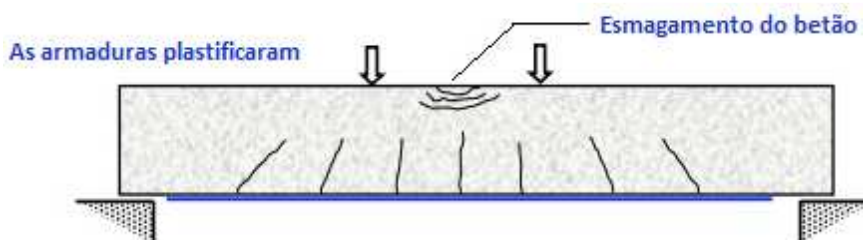


Figura 2.17: Esmagamento do betão após plastificação das armaduras [adaptado de 52]

- ii. Plastificação da armadura ordinária seguida de rotura do material de reforço (Figura 2.18);

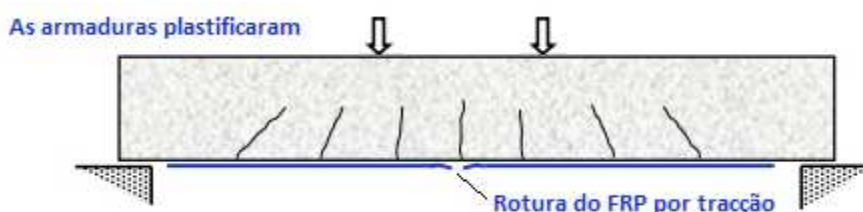


Figura 2.18: Rotura do material de reforço após plastificação das armaduras [adaptado de 52]

- iii. Esmagamento do betão devido a elevadas taxas de armadura ordinário e de reforço (Figura 2.19);

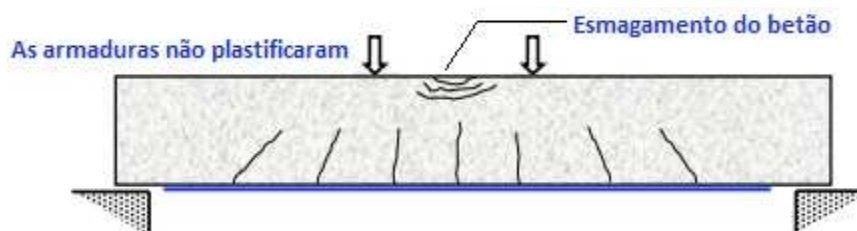


Figura 2.19: Esmagamento do betão sem plastificação das armaduras ordinárias [adaptado de 52]

2.4.3.2 Roturas prematuras

Como já foi referido anteriormente, é característica neste tipo de roturas, o facto dos materiais constituintes do sistema de reforço não atingirem os seus limites de tensões quando se verifica a rotura global do mesmo. Para além disso, as roturas que se verificam são bruscas e de carácter frágil, sendo importante considera-las na fase de dimensionamento [20].

No que diz respeito à técnica *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), é possível verificarem-se as seguintes roturas prematuras por perda de aderência em diferentes interfaces do sistema de reforço [20] (Figura 2.20):

- i. Destacamento do betão perto da superfície, no recobrimento do mesmo ou ao longo de uma camada mais debilitada devido a elevadas tensões de corte;
- ii. Destacamento no adesivo devido à sua fraca coesão;
- iii. Destacamento na interface entre o betão e o adesivo ou entre o adesivo e o material de reforço devido à incorreta preparação das superfícies durante o processo de aplicação do reforço;
- iv. Rotura do próprio compósito de FRP devido a forças de corte interlaminares.

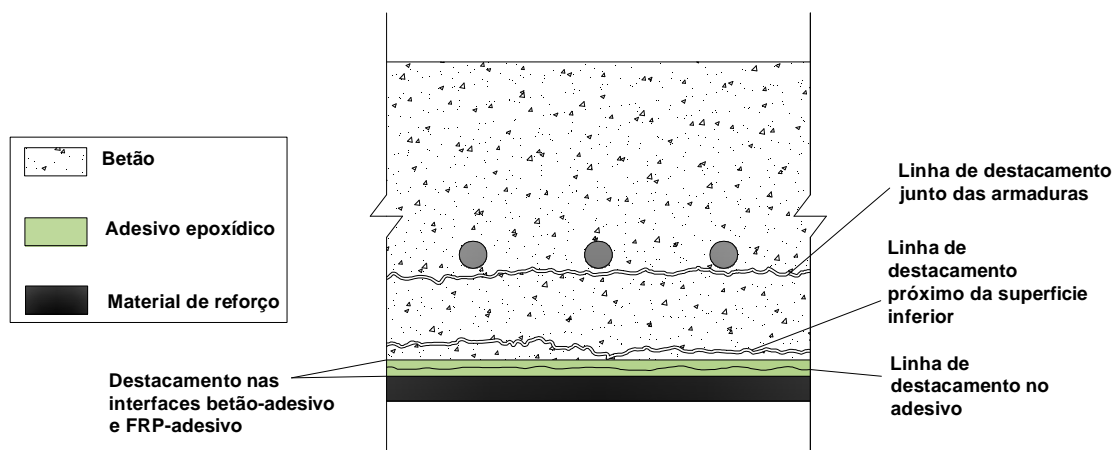


Figura 2.20: Roturas prematuras por perda de aderência na técnica EBR

Como refere o *bulletim 14* da FIB [20], as causas dos colapsos que têm origem nas roturas prematuras não se resumem apenas a problemas nas interfaces dos diferentes componentes do sistema de reforço. Existem fenómenos, designados por *peeling-off*, que consistem na perda de resistência do compósito FRP devido à propagação de um destacamento que já tenha surgido previamente em locais específicos do sistema de reforço.

Existem, assim, quatro modos de rotura por peeling-off que são numerados de I a IV, consoante a zona do sistema de reforço onde têm origem (Figura 2.21) [20].

- i. Modo I: Destacamento do material de reforço na zona de ancoragem sem existência de fendilhação do betão por presença de elevadas tensões de corte;
- ii. Modo II: Destacamento do material de reforço devido à propagação horizontal de fendas de flexão ao nível da interface betão-compósito. Este modo de rotura manifesta-se pelo destacamento do material de reforço em zonas afastadas das extremidades do FRP;
- iii. Modo III: Destacamento do material de reforço devido ao desenvolvimento de forças de desvio na zona mais traccionada do FRP, causadas por irregularidades na superfície do betão.
- iv. Modo IV: Destacamento do material de reforço causadas por fendas de corte que surgem associadas a movimentos verticais e horizontais nas faces das fendas.

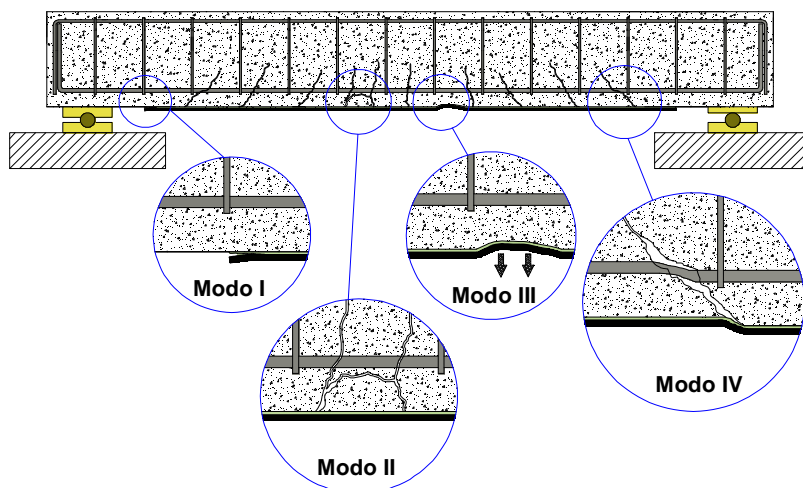


Figura 2.21: Roturas prematuras por peeling-off [adaptado de 20]

Em relação ao NSMR, os modos de rotura são bastante diferentes, sendo a partir da zona dos rasgos e do respectivo adesivo de enchimento das mesmas que se começam a desenvolver os diversos tipos de rotura. Com base em Lorenzis e Teng [53], os diferentes modos de rotura existentes nesta técnica podem ser enumerados da seguinte forma:

- i. Rotura na interface material FRP-adesivo:

Este tipo de roturas pode ter origem, tanto através da interface entre o compósito e o adesivo (Figura 2.22), como apenas no adesivo (Figura 2.23). As primeiras surgem, geralmente, quando o material de reforço apresenta uma superfície lisa ou quando não se obtém uma superfície suficientemente rugosa após o tratamento com areia. Pelo contrário, as roturas com origem apenas no adesivo verificam-se em superfícies rugosas do compósito de FRP bem como quando a resistência ao corte do adesivo é excedida.

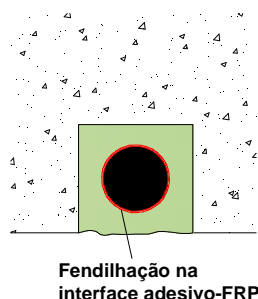


Figura 2.22: Rotura na interface adesivo-FRP
[adaptado de 53]

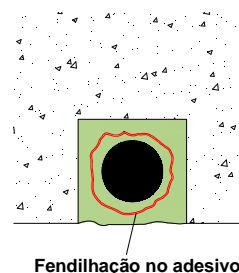


Figura 2.23: Rotura do adesivo próximo do FRP
[adaptado de 53]

ii. Rotura na interface adesivo-betão:

A rotura na interface adesivo-betão pode ocorrer, tanto na interface entre as paredes do rasgo e o adesivo (Figura 2.24), como no betão próximo dos rasgos (Figura 2.25).

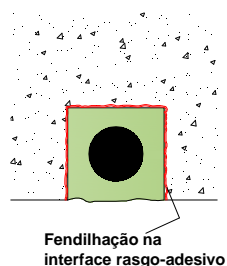


Figura 2.24: Rotura na interface rasgo-adesivo
[adaptado de 53]

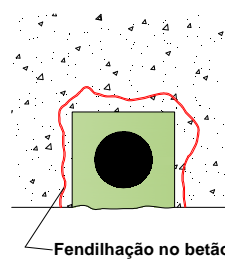


Figura 2.25: Rotura no betão próximo do rasgo
[adaptado de 53]

iii. Rotura do adesivo que cobre o material de reforço:

Este tipo de roturas pode surgir de diversas formas, nomeadamente, através da fissuração e separação do adesivo (Figura 2.26), fissuração do adesivo e do betão ao longo de planos inclinados (Figura 2.27), fissuração do betão sem que ocorra rotura do adesivo epoxídico (Figura 2.28) e fissuração de canto em situações em que o material FRP é colocado junto a uma das arestas da viga (Figura 2.29).

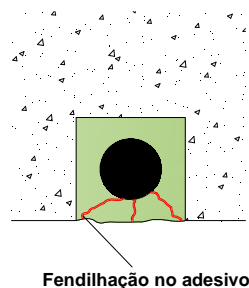


Figura 2.26: Rotura no adesivo [adaptado de 53]

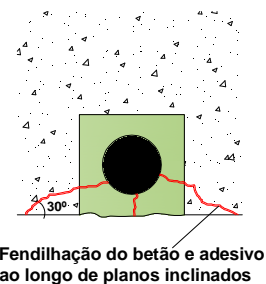


Figura 2.27: Rotura no betão e adesivo ao longo de planos inclinados [adaptado de 53]

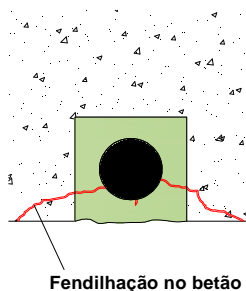


Figura 2.28: Rotura no betão [adaptado de 53]

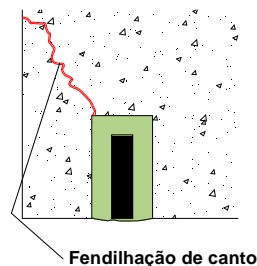


Figura 2.29: Rotura de canto [adaptado de 53]

2.4.4 Interface betão-compósito

Como já foi referido neste trabalho, quando se reforça uma estrutura de betão através de técnicas que recorram à colagem do material de reforço ao elemento de betão é importante ter especial atenção aos factores e condicionantes inerentes às zonas de interface dos materiais constituintes do sistema de reforço global. Um inadequado estudo acerca da compatibilidade ou mesmo a ausência de conhecimento das propriedades típicas desses materiais pode comprometer o desempenho da estrutura reforçada, dando origem a situações indesejadas, nomeadamente roturas prematuras e de carácter frágil ao nível das interfaces betão-compósito.

O comportamento das interfaces é caracterizado por leis constitutivas correspondentes ao comportamento sob a atuação de dois tipos de tensões, as normais e as de corte. Para caracterizar as interfaces betão-compósito, a comunidade científica interessou-se numa primeira abordagem, pelo desenvolvimento de modelos de aderência representativos da distribuição de tensões nos diferentes materiais através de ensaios de corte e de flexão. Após o desenvolvimento destes modelos que permitiram obter conclusões importantes no campo da distribuição de tensões ao longo da interface betão-compósito, surgiu então a necessidade de proceder à modelação do comportamento da ligação referida através da formulação de modelos de comportamento das ligações. Paralelamente, e não menos importantes, têm surgido métodos simplificados empíricos e semi-empíricos descritos em documentos regulamentares que procuram facilitar a análise das tensões e de fractura no processo de dimensionamento [47, 54].

2.4.4.1 Ensaios de aderência

Os ensaios de aderência surgiram com o objectivo de caracterizar as interfaces betão-compósito através da representação da distribuição das tensões normais e de corte. De entre todos os modelos de ensaio que procuram simular o comportamento da ligação referida, é possível destacar os seguintes:

- i. Ensaios de corte de junta dupla (Figura 2.30)
- ii. Ensaios de corte de junta simples (Figura 2.31)
- iii. Ensaios de flexão com entalhe a meio vão (Figura 2.32)

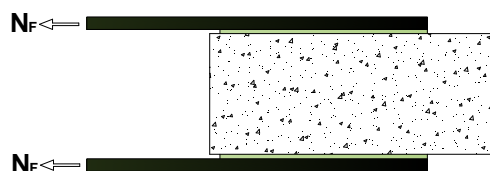


Figura 2.30: Ensaio de corte de junta dupla [adaptado de 2]

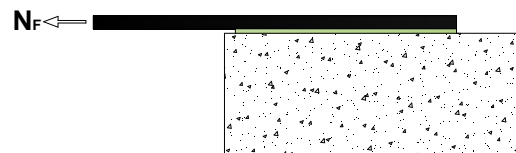


Figura 2.31: Ensaio de corte de junta simples [adaptado de 2]

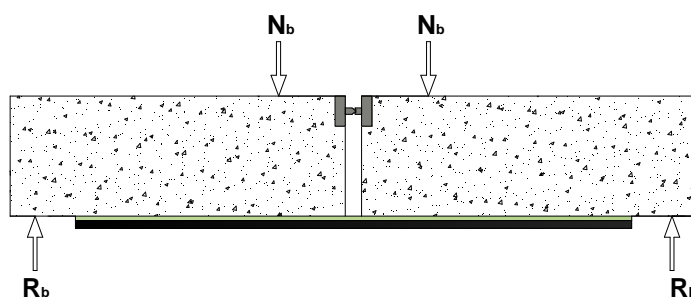


Figura 2.32: Ensaio de flexão com entalhe a meio vão [adaptado de 2]

As tensões de aderência no adesivo, obtidas com os modelos de flexão, são devidas à variação dos momentos flectores e à introdução de forças nas zonas de amarração, resultando assim na concentração de tensões de tração e de corte nas extremidades livres dos reforços (Figura 2.33) [47, 54].

No que diz respeito aos ensaios de corte, a tensão de tração no compósito e a tensão de corte na interface não se distribuem uniformemente ao longo da ligação. Como se pode verificar, na extremidade do material compósito começa-se a verificar um valor de pico de tensão de corte e quando esta atinge um valor máximo, o betão fendilha. A partir deste momento, é iniciado o fenómeno de destacamento do compósito causado pela movimentação progressiva do pico para a extremidade oposta da ligação (Figura 2.34) [47, 54].

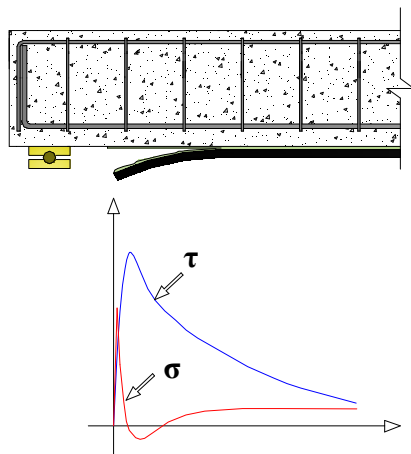


Figura 2.33: Distribuição das tensões no modelo de flexão [adaptado de 54]

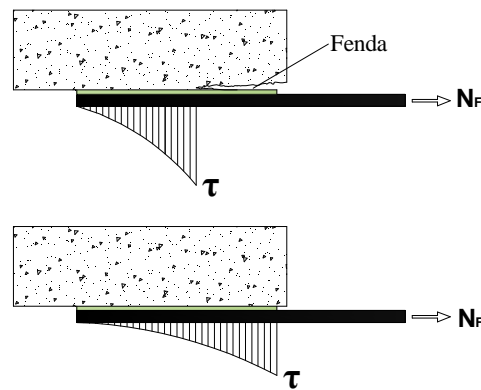


Figura 2.34: Distribuição das tensões no modelo de corte [adaptado de 54]

2.4.4.2 Modelos de comportamento da ligação betão-FRP

Os modelos de comportamento permitem modelar o desempenho da ligação betão-FRP, relacionando as tensões de aderência que se desenvolvem ao longo do compósito de FRP com o deslocamento relativo entre os materiais. Existem hoje em dia inúmeros modelos propostos por vários autores, nomeadamente Brosens et al. [55], Costeira da Silva [56], Taljsten [57], que aproximam o desempenho da ligação betão-FRP através das chamadas “leis de *bond slip*” [2, 58]. Para a definição destes modelos é necessário proceder à determinação da tensão de aderência máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$) e dos parâmetros relacionados com o deslizamento na interface betão-FRP (s_{max} e s_{ult}). Sendo definido o modelo, interessa proceder à calibração do parâmetro da energia de fractura (G_f), cujo valor é determinado através da área da lei constitutiva adoptada. Refira-se ainda que a energia de fractura consiste na energia que é necessário dissipar para que o destacamento total da ligação se verifique.

Na Figura 2.35 são representados alguns modelos que caracterizam o comportamento da ligação betão-FRP. São eles os modelos linear (Figura 2.35a), elásto-plástico (Figura 2.35b e Figura 2.35c), bi-linear (Figura 2.35d), quadrático (Figura 2.35e) e exponencial (Figura 2.35f).

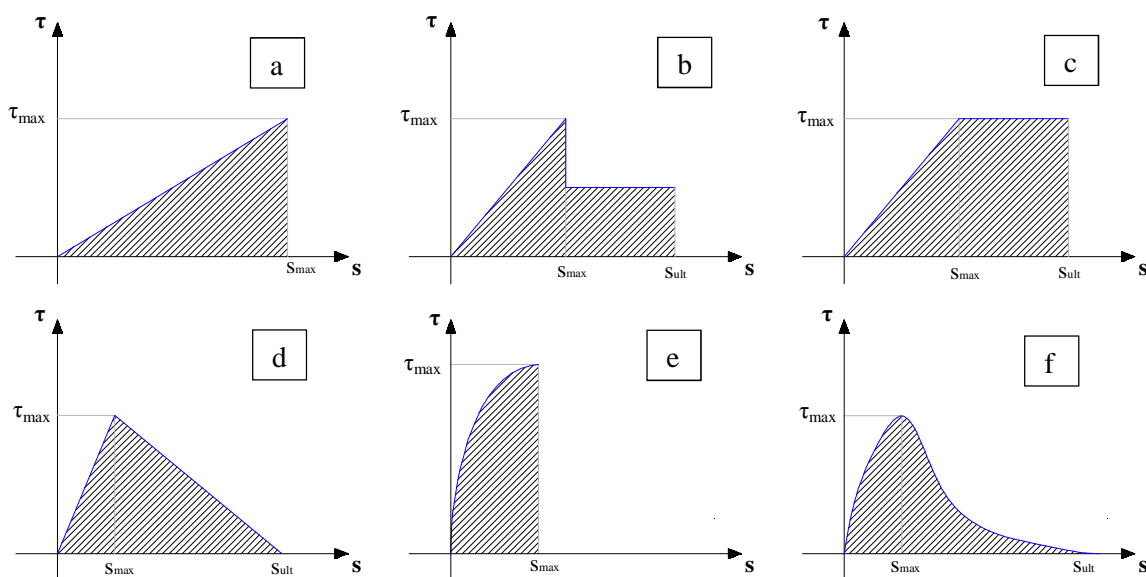


Figura 2.35: Modelos de comportamento da ligação betão-FRP [adaptado de 58]

2.4.4.3 Modelos empíricos e semi-empíricos

Os modelos empíricos e semi-empíricos consistem em relações estabelecidas a partir dos mecanismos associados ao comportamento das interfaces betão-compósito. Estes modelos simplificados são especialmente orientados para o dimensionamento em situações práticas, evitando a complexidade de certos aspectos característicos da aplicação dos modelos de comportamento.

O ACI 440F [51] ou o *bulletin* 14 da FIB [20] apresentam propostas para a utilização destes modelos, sendo desta forma possível prever o destacamento do material de reforço através da limitação de extensões no mesmo.

2.5 Códigos e regulamentação atual

Ao longo dos últimos anos, inúmeros investigadores e organizações têm vindo a trabalhar no desenvolvimento de critérios de dimensionamento, novas técnicas e procedimentos de construção de reforço de estruturas de betão com materiais compósitos de FRP. No entanto, devido à novidade do tema, multiplicidade dos campos de aplicação ou mesmo à divergência de opiniões em relação aos seus objectivos, a existência de regulamentação e documentos normativos é ainda muito limitada à escala mundial.

Os critérios de aplicação do reforço com compósitos de FRP nos países sem documentação específica, tem sido baseada nas recomendações e documentação elaborada pela FIB ou pelo ACI. Na Europa países como a Suíça, Itália, Alemanha ou a Grã-Bretanha, têm investido fortemente nos últimos anos no estudo das propriedades dos materiais, no desenvolvimento de recomendações de dimensionamento, aplicação e controlo de qualidade relativos à técnica de NSMR, e em maior escala à técnica de EBR. Já na América do Norte, o Canadá e os Estados Unidos têm-se centrado no desenvolvimento de critérios de dimensionamento de sistemas de reforço com compósitos de FRP. No continente asiático, o Japão e a China apresentam-se como os principais países impulsionadores do reforço com materiais compósitos, tendo estes países contribuído com múltiplas publicações institucionais de relevo na área.

Refira-se que, apesar de já haver algumas investigações sobre o sistema NSMR, existe ainda um grande défice de regulamentação ou normas aplicáveis para a referida técnica. A técnica EBR é, por conseguinte, a que surge maioritariamente referenciada em documentos normativos ou regulamentares.

Em Dezembro de 1996 o *Comité Européen du Béton* – CEB (fundado em 1953) criou, com base no formato do *Model Code* (CEB-FIP) e do Eurocódigo 2 (CEN), um grupo de trabalho com o objectivo de elaborar regulamentos de concepção relativos ao reforço de estruturas com materiais FRP. Com a fusão do *Comité Européen du Béton* CEB e da *Fédération Internationale de la Précontrainte* (FIP), surgiu em 1998 a FIB TG 9.3 – *FRP Reinforcement for concrete structures in Commission 9 Reinforcing and Prestressing Materials and Systems* [20].

Em Julho de 2001, é publicado o relatório técnico designado de *bulletin 14 – Externally bonded FRP reinforcement for RC structures* [20], que dispõe de critérios de dimensionamento e utilização de reforços de FRP colados externamente em elementos de betão armado, recomendações para aplicação em obra e critérios de controlo de qualidade. Este é o documento, que na atualidade, mais alerta o projetista para uma série de verificações de segurança inerentes, principalmente à técnica EBR. Para além dos documentos da FIB, existem outras publicações da instituição italiana CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*) que se baseiam no reforço de estruturas de betão com materiais FRP [59-61].

Nos Estados Unidos através do *American Concrete Institute* (ACI) e no Canadá através do *Intelligent Sensing for Innovative Structures* (ISIS) têm sido publicados diversos documentos e normas para o dimensionamento de sistemas de reforço com compósitos de FRP colados externamente em estruturas de betão armado. No ACI, o Comité 440 é responsável pela publicação de documentos importantes como o “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*” [51]. Este documento, destinado

essencialmente à técnica EBR, oferece informações sobre a história do uso de materiais compósitos FRP, as propriedades dos materiais FRP, recomendações sobre a engenharia, construção e inspeção dos sistemas de FRP utilizados para reforçar as estruturas de betão e ainda diversos exemplos de cálculo. No que diz respeito à técnica NSMR, atualmente o documento “*Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*” [62] define todos os conceitos básicos inerentes a este sistema, tanto como reforço ao corte como à flexão. Para além dos documentos do *American Concrete Institute* (ACI), existem também outras publicações da Norte-Americana *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) que em 2003 editou um relatório de especificações de orientação para o reforço de obras de arte com materiais compósitos de FRP (*Application of Fiber Reinforced Polymer Composites to the Highway Infrastructure*) [63] e em 2004 publicou o manual de recomendações e especificações referente à reparação de estruturas de betão armado com compósitos de FRP colados (*Bonded repair and retrofit of concrete structures using FRP composites*) [64]. De entre os documentos publicados pelo ISIS (Canadá) destaca-se o manual de dimensionamento nº4, publicado em Setembro de 2001, com a designação “*Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Reinforced Polymers*” [65]. Esta publicação é também baseada no dimensionamento de sistemas de reforço com materiais FRP, seguindo os mesmos temas abordados pelo documento desenvolvido pela ACI, mencionado anteriormente.

Em 1992, no continente asiático, com o apoio da *Association of Composite Materials Using Continuous Fiber for Concrete Reinforcement* (CCC), a *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE) publicou uma revisão do conhecimento baseado no trabalho feito até então, com o título “*Application of Continuous Fiber Reinforcing Materials to Concrete Structures*” [66]. Outros documentos publicados pela JSCE, têm surgido até aos dias de hoje com o objectivo de fornecer normas de projeto e construção referentes ao reforço de estruturas com elementos de fibras de carbono. Publicado no início do século XXI, destaca-se o *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures With Use of CFRP Sheets* [67].

3. Caracterização dos materiais

3.1 Considerações gerais

Com o objectivo de definir as propriedades mecânicas dos materiais constituintes dos sistemas de reforço estudados realizou-se um conjunto de ensaios de caracterização dos mesmos, tendo em conta as recomendações propostas nos documentos normativos existentes. Os referidos ensaios foram realizados maioritariamente no âmbito dos trabalhos experimentais de Carvalho [3].

Os materiais testados foram o betão e o aço constituintes dos modelos de vigas ensaiadas, bem como os laminados de CFRP e os respectivos agentes adesivos utilizados no reforço das mesmas. No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais referidos, sendo estes comparados aos valores fornecidos pelos respectivos fabricantes.

3.2 Aço

Os modelos de vigas estudadas foram armados com varões de aço de diâmetros de 6, 8 e 12 milímetros, todos pertencentes à classe A500. Com o objectivo de determinar as propriedades mecânicas do aço utilizado foram realizados, segundo Carvalho [3], ensaios de tração de acordo com a norma NP-ENV 10002-1 [68], utilizando uma máquina de tração universal INSTRON com capacidade de aproximadamente 200 kN. Para medir os respectivos valores de extensão no decorrer dos ensaios foi utilizado um conjunto de extensómetros mecânicos. Refira-se que os ensaios de tração referidos foram realizados no laboratório de estruturas do Instituto Superior Técnico.

Segundo Carvalho [3] verificou-se uma grande dispersão ao nível dos resultados experimentais do módulo de elasticidade (E_{sm}), e como tal adoptou-se o valor de 200 GPa. Como se pode verificar na Tabela 3.1, com os ensaios realizados, foram obtidos os valores médios referentes à tensão de cedência (f_{ym}), tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ($f_{0,2m}$), tensão de rotura de tração (f_{tm}) e respectivas extensões total na força máxima (ϵ_{sum}) e de rotura (ϵ_{srm}).

Aço	f_{ym} (MPa)	$f_{0,2m}$ (MPa)	f_{tm} (MPa)	E_{sm} (GPa)	ϵ_{sum} (%)	ϵ_{srm} (%)
Ø6	-	568	721	200	10,95	13,01
Ø8	566	-	680		11,95	14,56
Ø12	546	-	649		14,29	18,64

Tabela 3.1: Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do aço [3]

Nas Figuras 3.1 a 3.3 os diagramas tensão-deformação referentes aos ensaios dos varões de aço utilizados.

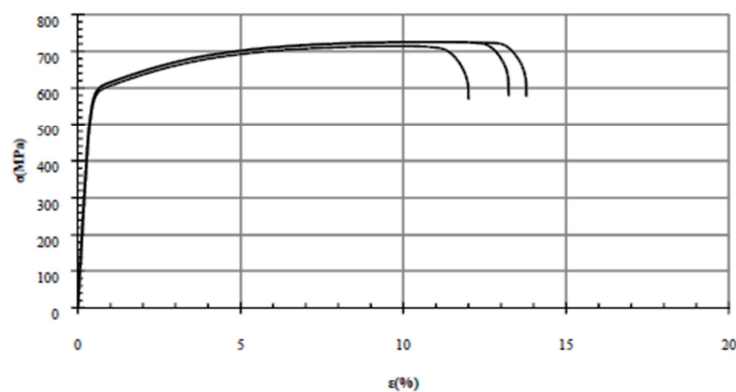


Figura 3.1: Diagrama tensão-deformação referentes aos varões de aço endurecidos a frio ($\varnothing 6$) [3]

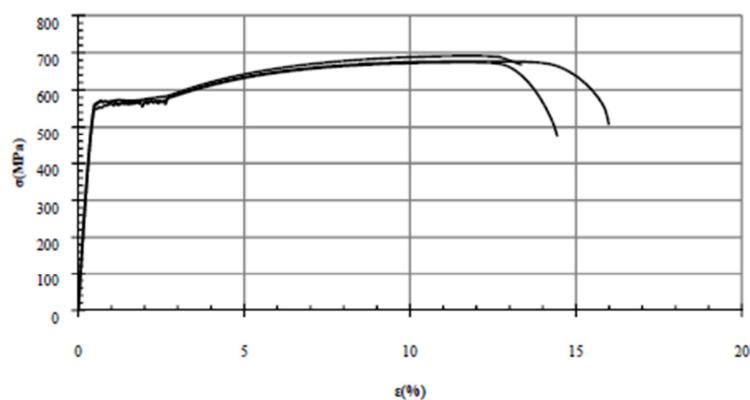


Figura 3.2: Diagrama tensão-deformação referentes aos varões de aço laminados a quente ($\varnothing 8$) [3]

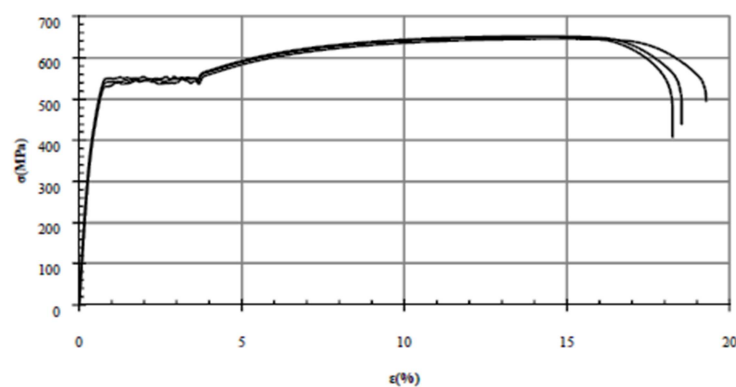


Figura 3.3: Diagrama tensão-deformação referentes aos varões de aço laminados a quente ($\varnothing 12$) [3]

Para os varões de aço laminados a quente verifica-se que estes apresentam um primeiro troço correspondente ao regime elástico cuja extensão limite do mesmo varia entre 0,2% e 0,3% nos dois

casos. No que diz respeito à extensão referente ao fim do patamar de cedência (troço de tensão constante no aço) verifica-se que os varões de 8 milímetros apresentam valores próximos de 2,5 % enquanto os varões de 12 milímetros rondam os 3,5 %. Como se pode observar, o diagrama referente aos varões com diâmetro de 6 milímetros descrevem um andamento característico de um aço endurecido a frio cujo patamar de cedência é inexistente.

3.3 Betão

Para a caracterização mecânica do betão utilizado nos modelos ensaiados foram produzidos nas instalações fabris da empresa Precore, juntamente com as vigas de secção transversal em T, trinta e três provetes cúbicos de betão com $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ e três provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Os provetes produzidos foram posteriormente ensaiados por Carvalho [3] no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa através de uma prensa Form+Test/Seidner 3000D com capacidade de carga até 3000 kN e imposição de deslocamentos até 50 milímetros. Excepto três provetes cilíndricos e três cúbicos destinados à caracterização do betão aos 28 dias de idade, todos os restantes foram utilizados para caracterizar o betão nas datas dos ensaios das vigas estudadas por Carvalho [3].

De acordo com os ensaios realizados aos provetes cúbicos e cilíndricos de betão, e tendo em conta as Eq.3.1 a 3.3 presentes no Eurocódigo 2 [69], foi possível resumir os resultados obtidos experimentalmente para caracterizar o betão com 28 dias de idade. Assim, na Tabela 3.2 são apresentados os valores de tensão de rotura à tração e compressão médias dos provetes cúbicos e cilíndricos (f_{cm} , f_{ctm}), tensão de rotura por flexão ($f_{ct,fl}$) e módulo de elasticidade (E_c) do betão aos 28 dias de idade.

$$f_{ctm} = 0,9 \times f_{ct,sp} \quad (3.1)$$

$$f_{ct,fl} = \max \left\{ \left(1,6 - \frac{h_{secção}}{1000} \right) \times f_{ctm}; f_{ctm} \right\} \quad (3.2)$$

$$E_{cm} = 22 \times \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \times 0,9 \quad (3.3)$$

Provetes	Tipo	Idade (dias)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ct,fl}$ (MPa)	E_{cm} (GPa)
C1	Cubo	28	23,1	23,07	-	-	-	-	23,8
C2	Cubo		22,9		-				
C3	Cubo		23,2		-				
C4	Cilindro		18,5	1,87	2,04	1,84	2,36		
C5	Cilindro		18,3	2,07					
C6	Cilindro		18,6	2,19					

Tabela 3.2: Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do betão aos 28 dias de idade [3]

Visto que no âmbito deste trabalho não existiam provetes de betão para caracterizar o mesmo nas datas dos ensaios realizados, optou-se pela utilização das Eq.3.4 a 3.6 presentes no Eurocódigo 2 para a determinação das tensões de rotura à compressão e tração médias ($f_{cm}(t)$, $f_{ctm}(t)$) e módulo de elasticidade ($E_c(t)$) do betão em diferentes idades. Como tal, tendo em conta que as vigas foram betonadas no dia 18 de Março de 2009, foi possível construir a Tabela 3.3, na qual são apresentados os valores referentes à caracterização do betão extrapolados para as datas dos ensaios realizados no âmbito deste trabalho.

$$f_{cm}(t) = e^{\left(0,25\left(1-\left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right)\right)} \times f_{cm} \quad (3.4)$$

$$f_{ctm}(t) = \left(e^{\left(0,25\left(1-\left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right)\right)}\right)^{\frac{2}{3}} \times f_{ctm} \quad (3.5)$$

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0,3} \times E_{cm} \quad (3.6)$$

onde f_{cm} , f_{ctm} e E_{cm} dizem respeito, respectivamente, às tensões de rotura à compressão e tração e ao módulo de elasticidade determinados à idade de 28 dias. Por outro lado, $f_{cm}(t)$, $f_{ctm}(t)$ e $E_{cm}(t)$ representam, respectivamente, as tensões de rotura à compressão e tração e o módulo de elasticidade determinados à idade pretendida (t em dias).

Viga	Idade em dias (t)	$f_{cm}(t)$ (MPa)	$f_{ctm}(t)$ (MPa)	$E_{cm}(t)$ (GPa)
V6	1336	22,87	2,12	25,38
V7	1373	22,88	2,12	25,38
V8	1443	22,90	2,12	25,39
V9	1560	22,93	2,13	25,40
V10	1584	22,94	2,13	25,40

Tabela 3.3: Extrapolação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização do betão para as idades relativas às datas dos respectivos ensaios das vigas em estudo

3.4 Compósitos de CFRP

3.4.1 Laminado de Fibra de Carbono S&P 150/2000 (10x1,4)

Os compósitos de CFRP S&P 150/2000 (10x1,4) são descritos como elementos pré-fabricados em forma de laminados, de cor preta, com 10 milímetros de largura e 1,4 milímetros de espessura cujas respectivas fibras se organizam unidireccionalmente (Figura 3.4). Tal como todos os compósitos deste género, os laminados S&P 150/2000 (10x1,4) são considerados como elementos de elevada resistência, elevado módulo de elasticidade, bom comportamento perante fenómenos de fadiga e não susceptíveis de corrosão. Segundo o fabricante, estes são produzidos essencialmente para aplicações no reforço à flexão com as técnicas *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) ou *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSMR).

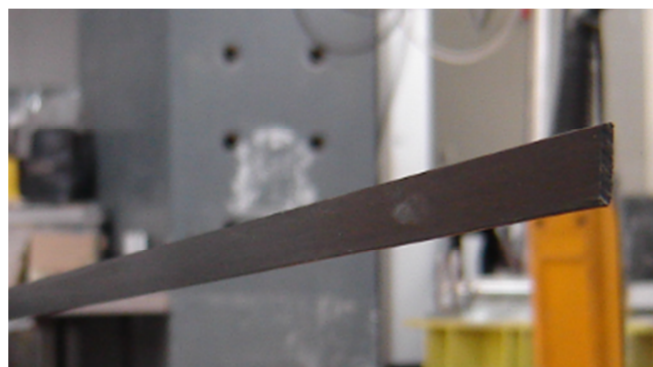


Figura 3.4: Laminado de Fibra de Carbono S&P 150/2000 (10x1,4)

Para a determinação das propriedades mecânicas dos laminados aqui descritos, procedeu-se ao ensaio de tração em cinco provetes instrumentados com um extensómetro cada. Estes ensaios foram também realizados no âmbito dos trabalhos de Carvalho [3] nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa através de uma máquina universal Zwick com 50 kN de capacidade.

Na Figura 3.5 mostram-se os diagramas tensão-deformação obtidos através dos ensaios realizados aos provetes de laminado S&P 150/2000 (10x1,4).

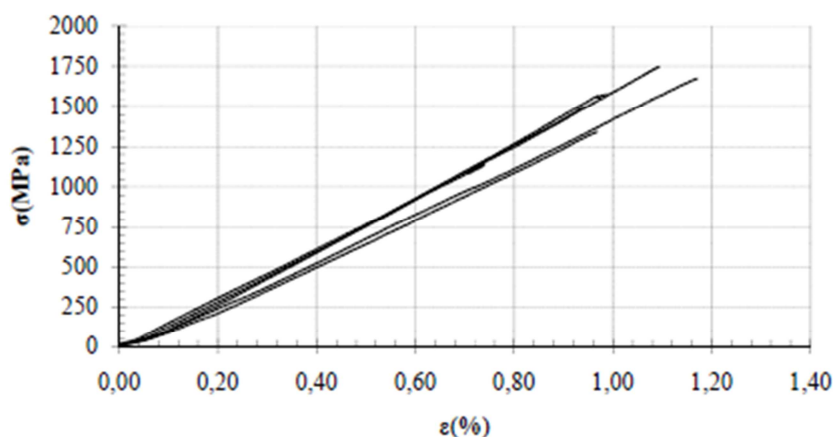


Figura 3.5: Diagrama tensão-deformação dos provetes de laminado S&P 150/2000 (10x1,4) testados à tração [3]

Observando a Figura 3.5, é possível constatar o comportamento elástico e linear típico até à rotura deste tipo de material.

Os valores dos ensaios de caracterização dos laminados e os respectivos valores médios do módulo de elasticidade (E_{fm}), extensão de rotura (ε_{fm}) e tensão de rotura (f_{fm}) encontram-se indicados na Tabela 3.4.

Proвете	E_f (GPa)	E_{fm} (GPa)	ε_f (%)	ε_{fm} (%)	f_f (MPa)	f_{fm} (MPa)
F1	164	159	0,94	1,03	1488	1565
F2	165		0,99		1575	
F3	148		1,17		1674	
F4	168		1,09		1746	
F5	150		0,97		1342	

Tabela 3.4: Resumo dos dados obtidos com os ensaios de caracterização do CFRP:

3.5 Adesivos epoxídicos

3.5.1 Resina S&P 220

A resina S&P 220 pode ser descrita como um agente adesivo de cor cinzenta formado pela mistura de dois componentes, o adesivo epoxídico (A) e o respectivo endurecedor (B) (Figura 3.6). Segundo os dados do fabricante, a referida mistura é realizada numa proporção de 4:1 (A:B) em termos de peso. O intervalo de tempo durante o qual o material é utilizável sem dificuldades (*pot life*) é estimado em aproximadamente 25 minutos (a 25°C). De entre todas as características especificadas pelo fabricante, salientam-se também a boa resistência mecânica e elevada resistência de aderência.

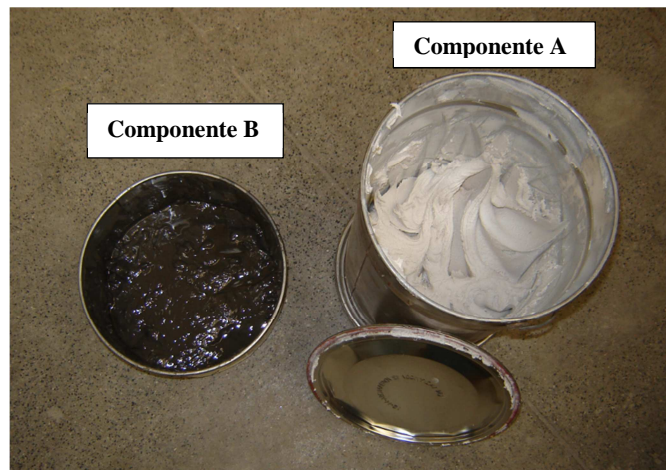


Figura 3.6: Dois componentes da resina S&P 220

Para determinar as propriedades mecânicas da resina S&P 220, Carvalho [3] produziu três provetes com 160 milímetros de comprimento e 40 milímetros de largura e altura, aos quais foram realizados ensaios à flexão em três pontos, cujo vão livre entre os apoios era de 100 milímetros. Os ensaios referidos tiveram lugar nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa.

Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização foram tratados tendo em conta as Eq.3.7 e Eq.3.8 [70] onde b , h e L dizem respeito às dimensões dos provetes e δ ao deslocamento a meio vão dos mesmos ao longo da aplicação da força F . Desta forma, foi possível traçar o diagrama tensão-deformação referente ao comportamento da resina S&P 220 à tração quando submetida a esforços de flexão.

$$f = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = 6 \times \frac{\delta \times h}{L^2} \quad (3.8)$$

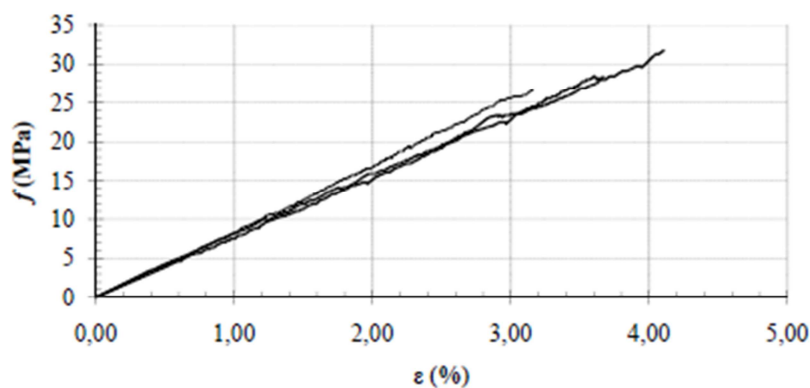


Figura 3.7: Diagrama tensão-deformação de tração da resina S&P 220 quando submetida á flexão [3]

Apresenta-se na Tabela 3.5 o resumo dos resultados obtidos referentes ao módulo de elasticidade (E_{pt}), extensão e tensão de rotura à tração por flexão (ϵ_{pt} , f_{pt}) dos três provetes testados.

Proвете	E_{pt} (GPa)	E_{ptm} (GPa)	ϵ_{pt} (%)	ϵ_{ptm} (%)	f_{pt} (MPa)	f_{ptm} (MPa)
R1	0,87	0,79	3,16	3,65	26,7	29
R2	0,75		4,11		31,8	
R3	0,76		3,67		28,5	

Tabela 3.5: Resumo dos resultados obtidos com os ensaios de caracterização da resina à tração por flexão

3.5.2 Resina HILTI HIT-RE 500

A resina HILTI-HIT-RE 500, de cor vermelha, é formada também pela mistura de dois componentes. Neste caso, a percentagem de cada componente utilizada para a respectiva mistura foi controlada através de um misturador da mesma marca. Tal como se procedeu no caso a resina S&P 220, para caracterizar mecanicamente a resina HILTI-HIT-RE 500 foram realizados três provetes com dimensões de 160x40x40 mm (Figura 3.8). Estes provetes foram testados nos laboratórios da Universidade Nova de Lisboa através de ensaios de flexão em três pontos, com um vão livre de 100 mm.



Figura 3.8: Pormenor dos três provetes

Através das Eq.3.7 e Eq.3.8 foi possível determinar os respectivos valores de tensão e extensão de rotura à tração por flexão, sendo assim possível construir o gráfico da Figura 3.9, representativo do comportamento dos três provetes de resina.

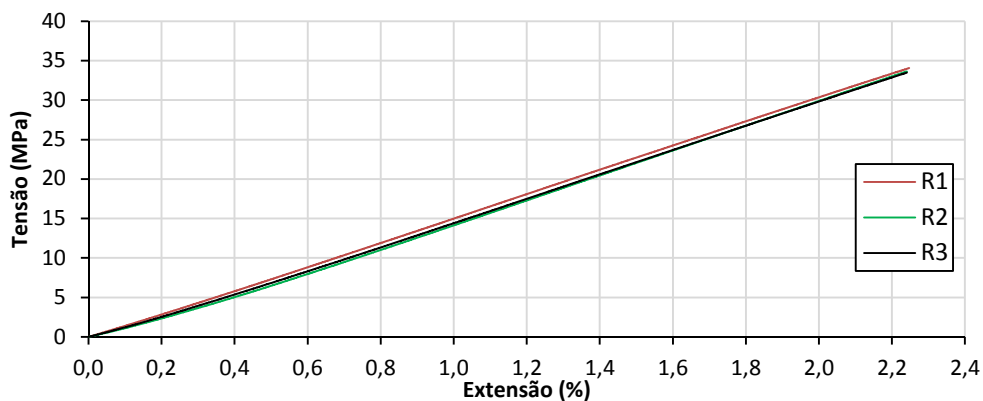


Figura 3.9: Diagrama tensão-deformação da resina HILTI HIT RE 500 quando submetida á flexão

De forma a resumir os valores obtidos referentes ao módulo de elasticidade (E_{pt}), extensão e tensão de rotura à tração por flexão (ϵ_{pt} , f_{pt}) é apresentada a Tabela 3.6.

Proвете	E_{pt} (GPa)	E_{ptm} (GPa)	ϵ_{pt} (%)	ϵ_{ptm} (%)	f_{pt} (MPa)	f_{ptm} (MPa)
R1	1,51	1,51	2,25	2,28	34,1	34,4
R2	1,51		2,30		34,6	
R3	1,50		2,30		34,4	

Tabela 3.6: Resumo dos dados obtidos com os ensaios de caracteriza

4. Programa Experimental

4.1 Considerações gerais

O comportamento estrutural de elementos de betão armado é melhorado significativamente quando reforçados com materiais compósitos de CFRP, tanto ao nível da resistência como da rigidez. No entanto, verifica-se que na grande maioria das situações é bastante difícil conseguir tirar partido de toda a resistência dos compósitos de CFRP. Tendo por objectivo explorar a capacidade total do compósito de CFRP estudaram-se e desenvolveram-se duas novas técnicas de reforço, baseadas nas técnicas EBR e NSMR, designadas por *Externally Bonded Reinforcement Anchorage* (EBRA) e *Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement* (HNSMR), cujas descrições são feitas ao longo deste capítulo. No sentido de estudar o desempenho destas técnicas de reforço em vigas de betão armado, foi realizado no laboratório de estruturas do departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa um conjunto de ensaios experimentais a cinco vigas de betão armado de secção transversal em T. Estas fazem parte de um conjunto de dez vigas idênticas produzidas em simultâneo, em Março de 2009, com 3,3 metros de comprimento e 0,3 metros de altura. Destas dez vigas, já tinham sido utilizadas cinco, em 2010, para os ensaios laboratoriais levados a cabo no mesmo local no âmbito do trabalho realizado por Carvalho [3] e cujo objectivo se centrou no estudo das técnicas de reforço EBR e NSMR. Com o intuito de alargar o conhecimento do comportamento das técnicas EBR e NSMR, Carvalho [3] produziu dois modelos por cada sistema de reforço, sendo estes sujeitos a ações monotónicas e cíclicas. A viga V1 foi ensaiada como modelo de referência, sem qualquer tipo de reforço. Refira-se que os dados obtidos, tanto da viga V1 como dos restantes modelos estudados por Carvalho [3], serão tidos em conta neste trabalho no sentido de comparar os desempenhos das técnicas de reforço estudadas.

No âmbito deste trabalho foram utilizados laminados de CFRP para reforçar as cinco vigas pertencentes aos modelos estudados. Destas vigas, três foram reforçadas através da técnica EBRA, das quais duas foram testadas com carregamento monotónico e a restante com carregamento cíclico. Nos dois modelos restantes, ensaiados monotonicamente e ciclicamente, foi aplicada a segunda técnica de reforço proposta (HNSMR).

Este capítulo será dividido em sete partes. Na primeira, faz-se a descrição dos modelos ensaiados em termos de geometria bem como de outros parâmetros referentes à concepção das mesmas. Numa segunda fase são descritas as etapas que foram seguidas na execução das vigas ao longo da concepção das mesmas. Na fase seguinte são descritos os aspectos relacionados com a montagem

do sistema de ensaio. É na quinta parte deste capítulo que são apresentadas as técnicas propostas no âmbito desta dissertação, enumerando-se as etapas do faseamento construtivo das mesmas. Finalmente, as duas últimas partes do presente capítulo ficam reservadas à descrição da instrumentação das vigas e da aquisição de dados, bem como aos procedimentos de ensaio onde é dada especial importância aos regimes de carregamento aplicados (monotónico e cíclico).

4.2 Descrição dos modelos de vigas utilizados

Tal como já foi mencionado, devido à necessidade de se compararem as técnicas propostas neste trabalho com as técnicas NSMR e EBR já estudadas por Carvalho [3], interessava que os modelos usados fossem idênticos aos utilizados por Carvalho [3]. Como tal, o programa experimental apresentado no âmbito deste trabalho envolveu a utilização de cinco modelos de vigas idênticas às de Carvalho, todas concebidas em simultâneo no ano de 2009.

Todas as vigas em betão armado de secção transversal em T foram produzidas e dimensionadas tendo em conta certas condicionantes inerentes aos recursos disponíveis nos laboratórios da Universidade Nova de Lisboa nomeadamente em termos de disponibilidade de equipamento ou das características das instalações. Como tal, as vigas de betão armado com secção em T e ensaiadas à escala real tinham 3,3 metros de comprimento e 0,3 metros de altura. A alma da viga possuía 0,22 metros de altura e 0,15 metros de largura, enquanto o banzo totalizava uma altura de 0,08 metros e uma largura de 0,4 metros (Figura 4.1).

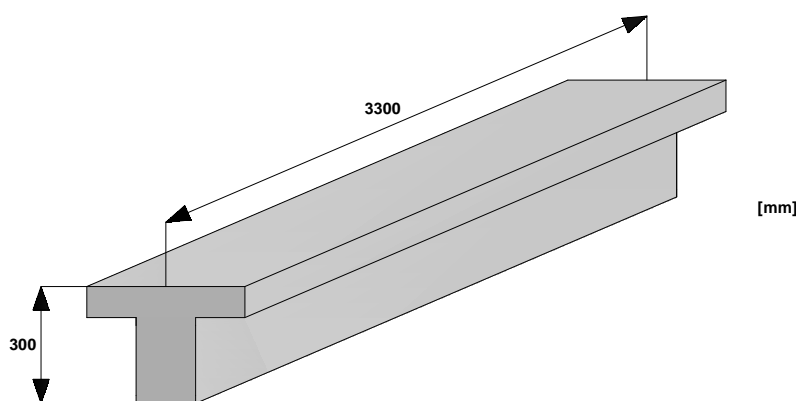


Figura 4.1: Vigas utilizadas

Refira-se que a razão pela qual se optou pela secção transversal em T para as vigas ensaiadas, prendeu-se essencialmente com a necessidade de tentar simular a contribuição da laje na resistência às tensões de compressão em flexão.

No que toca ao dimensionamento e pormenorização das armaduras, todos os modelos foram projetados tendo em conta a necessidade de se proceder ao estudo dos mesmos quando solicitados à flexão, procurando prevenir roturas prematuras por corte. Longitudinalmente, as vigas eram constituídas por três varões de 12 milímetros ($3\varnothing 12$) na zona traccionada e por seis varões de 8 milímetros ($6\varnothing 8$) no banzo das mesmas. No que toca às armaduras transversais, foram colocados ao longo das vigas estribos de diâmetro de 6 milímetros com um afastamento de 15 centímetros ($\varnothing 6//150$). Com a mesma distribuição e diâmetros idênticos, foram também pormenorizadas as armaduras transversais dos banzos das vigas. Nas Figuras 4.2 e 4.3 são representadas a pormenorização longitudinal e transversal, respectivamente, das armaduras dos modelos de vigas em estudo.

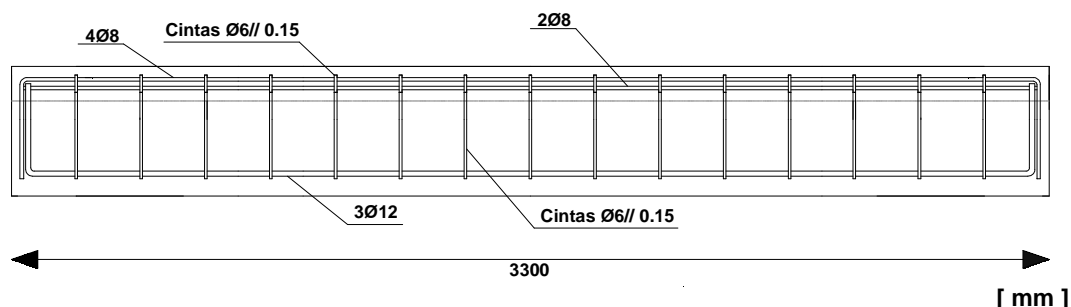


Figura 4.2: Pormenorização longitudinal das vigas em estudo

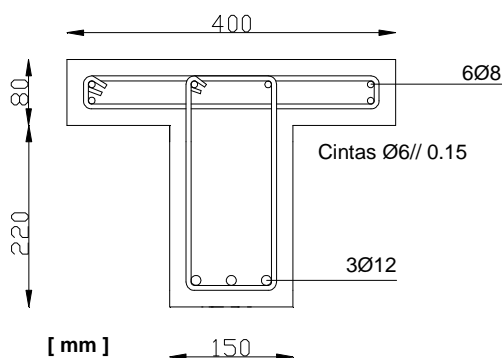


Figura 4.3: Pormenorização transversal das vigas em estudo

Para facilitar a identificação das vigas reforçadas com as técnicas utilizadas procedeu-se à numeração das mesmas. Assim, o modelo V6 e V7 foram atribuídos às vigas reforçadas com a técnica EBRA e ensaiadas através de carregamento monotónico e cíclico, respectivamente. Pelas razões descritas mais adiante, optou-se por produzir um modelo, idêntico ao modelo V6, definido como V8. Por outro lado, o modelo V9 ensaiado com carregamento monotónico e o modelo V10 testado com carregamento cíclico foram atribuídos às vigas reforçadas com a técnica HNSMR.

Refira-se que esta sequência de modelos surge no seguimento dos modelos definidos nos trabalhos de Carvalho [3] onde os modelos V2 e V3 correspondem às vigas reforçadas com a técnica EBR e ensaiadas segundo um regime monotónico e cíclico, respectivamente. Os modelos V4 e V5 seguem a mesma lógica sequencial, no entanto ambos destinados ao reforço através da técnica NSMR. Não menos importante, e que é tida em conta também neste trabalho, é a viga de referência que toma a designação de V1. Esta última foi ensaiada até à rotura nos trabalhos de Carvalho [3] através de um carregamento monotónico.

Por forma a resumir toda a informação referente à designação dos modelos e respectivas técnicas utilizadas é apresentada a Tabela 4.1 que descreve para cada modelo a técnica de reforço, o tipo de material de reforço, o agente adesivo e o tipo de carregamento aplicado.

Modelo	Técnica de Reforço	Tipo de Material de Reforço	Agente Adesivo	Carregamento
V1 ¹	-	-	-	Monotónico
V2 ¹	EBR	Laminado CFRP S&P 150/2000 50x1,2	Resina S&P 220	Monotónico
V3 ¹				Cíclico
V4 ¹	NSMR	Monotónico		
V5 ¹		Cíclico		
V6	EBRA	Laminado CFRP S&P 150/2000 10x1,4	Resina S&P 220 Resina HILTI (HIT-RE500)	Monotónico
V7				Cíclico
V8			Monotónico	
V9	HNSMR		Resina S&P 220	Monotónico
V10		Cíclico		

Tabela 4.1: Resumo dos modelos utilizados

4.3 Preparação das vigas de betão armado

O conjunto de dez vigas, das quais cinco foram utilizadas no âmbito do presente trabalho, foram produzidas nas instalações fabris da empresa de pré-fabricação Precore localizadas na cidade do Montijo. Carvalho [3] acompanhou o processo de execução das vigas, bem como a instrumentação das armaduras de aço.

Para a realização das vigas em estudo, e de acordo com os regulamentos existentes, foram seguidas as respectivas etapas relativas ao processo de execução de vigas pré-fabricadas em betão armado. Assim, o processo iniciou-se com a preparação da cofragem e com a montagem das armaduras transversais e longitudinais das vigas (Figura 4.4). Após esta etapa verificou-se o correto

¹ As vigas V1, V2, V3, V4 e V5 foram designadas nos trabalhos de Carvalho de TSC1, TSC2, TSC3, TSC4 e TSC5, respectivamente.

posicionamento dos espaçadores que garantem o recobrimento pretendido (2 cm) e procedeu-se à instrumentação das armaduras através de três extensómetros. Destes extensómetros, dois foram colados nas armaduras longitudinais a meio vão e o restante no primeiro estribo situado à distância d do apoio. Por fim, todas as vigas foram betonadas assim como os cubos de caracterização das propriedades do betão (Figura 4.6). A cura dos elementos betonados fez-se num período de uma semana (Figura 4.7). As figuras seguintes mostram algumas das etapas referentes ao processo de produção das vigas em estudo.



Figura 4.4: Preparação e montagem das armaduras ordinárias [3]



Figura 4.5: Linha de betonagem das vigas estudadas [3]



Figura 4.6: Betonagem das vigas estudadas [3]

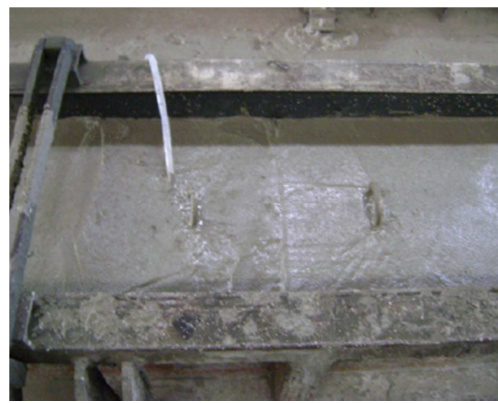


Figura 4.7: Cura do betão das vigas estudadas [3]

Segundo Carvalho [3], o processo de betonagem, tanto das vigas como dos cubos de caracterização do betão, bem como as restantes etapas da execução dos mesmos elementos decorreu sem que se verificasse quaisquer problemas ou irregularidades, tendo sido seguidas todas as recomendações características de um processo deste género. Para além disto, a cura dos cubos foi feita nas mesmas condições de humidade e temperatura dos modelos de vigas, sem recurso à imersão em tanques de saturação.

No entanto, apesar do procedimento de execução das vigas ter seguido as etapas tal como foram aqui descritas, verificou-se mais tarde que existiam fendas de retração na superfície do betão das mesmas. Para além disto, após os ensaios laboratoriais, e através da confirmação por intermédio da execução de cortes transversais das vigas, constatou-se que as dimensões do recobrimento das vigas não era o pretendido (sendo de três a quatro centímetros, e não de dois centímetros como foi definido previamente) e que havia deficiências no alinhamento dos respectivos varões longitudinais.

4.4 Sistema de ensaio

Para a transmissão de cargas às vigas em estudo admitiu-se um sistema de transmissão em quatro pontos, de forma simétrica em relação ao eixo das vigas (Figura 4.8). Sendo uma das razões desta escolha o facto de este ser um dos sistemas mais utilizado em ensaios deste género, teve-se também em conta a necessidade de se poderem comparar os resultados obtidos neste estudo aos resultados conseguidos por outros trabalhos já realizados nomeadamente os de Carvalho [3] cujo sistema de transmissão de cargas foi idêntico. Com este sistema é conseguido um diagrama de momentos flectores trapezoidal, cujos valores máximos se situam ao longo da distância compreendida entre os dois pontos de aplicação das cargas.

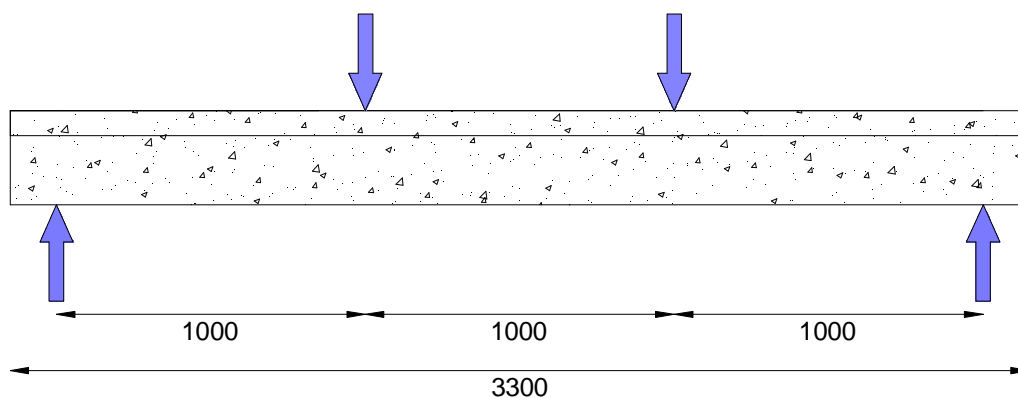


Figura 4.8: Transmissão de cargas em quatro pontos

Como se compreende, o sistema de ensaio foi criado e posteriormente montado com base no espaço e noutros recursos disponíveis nos laboratórios do departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa. Assim, após a montagem obteve-se um sistema de ensaio composto por dois blocos de betão, os quais serviam de base aos aparelhos de apoio móvel (Figura 4.9.b) e fixo de forma a fazer da viga um elemento estrutural bi-apoiado. Superiormente às vigas assentes nos apoios, foram apoiados dois perfis metálicos unidos perpendicularmente através de um tubo de aço devidamente aparafusado. Por sua vez estes perfis metálicos serviram de apoio aos dois

cilindros hidráulicos (ENERPAC RRH307) (Figura 4.9.d), dispostas de forma simétrica sob o perfil metálico superior. Refira-se que a transferência das cargas entre os perfis metálicos e a viga a ensaiar era concretizada através de dois outros apoios (fixo e móvel) (Figura 4.9.c), assentes na face superior do banzo da viga. Superiormente aos cilindros hidráulicos foram montadas duas células de carga (CLC-200KNA) (Figura 4.9.a) para que as cargas transmitidas às vigas no momento dos ensaios fossem corretamente quantificadas. A correta transmissão de cargas para a viga de betão armado foi garantida através de dois varões de pré-esforço restringidos nas suas extremidades tanto na laje como no topo das células de carga. Os varões foram colocados de forma a intersectarem o conjunto dos cilindros hidráulicos, células de carga e perfil metálico superior.



Figura 4.9: Sistema de ensaio; a) célula de carga; b) Apoio deslizante; c) Apoio dos perfis metálicos; d) Cilindro hidráulico

4.5 Apresentação das técnicas de reforço utilizadas

4.5.1 Técnica EBRA

4.5.1.1 Considerações gerais

A técnica designada de *Externally Bonded Reinforcement Anchorage* (EBRA) proposta no âmbito da presente dissertação tem como objectivo eliminar os modos de rotura prematuras observadas correntemente na técnica EBR, permitindo explorar a capacidade total do compósito de FRP no reforço de vigas de betão armado.

O sistema EBRA diferencia-se da técnica EBR (Figura 4.10) no facto das extremidades do compósito de FRP serem ancoradas ao elemento estrutural através de furos inclinados realizados no mesmo e preenchidos com resina epoxídica (Figura 4.11). No presente trabalho o material de reforço utilizado foram barras de fibra de carbono (CFRP) em forma de laminado.

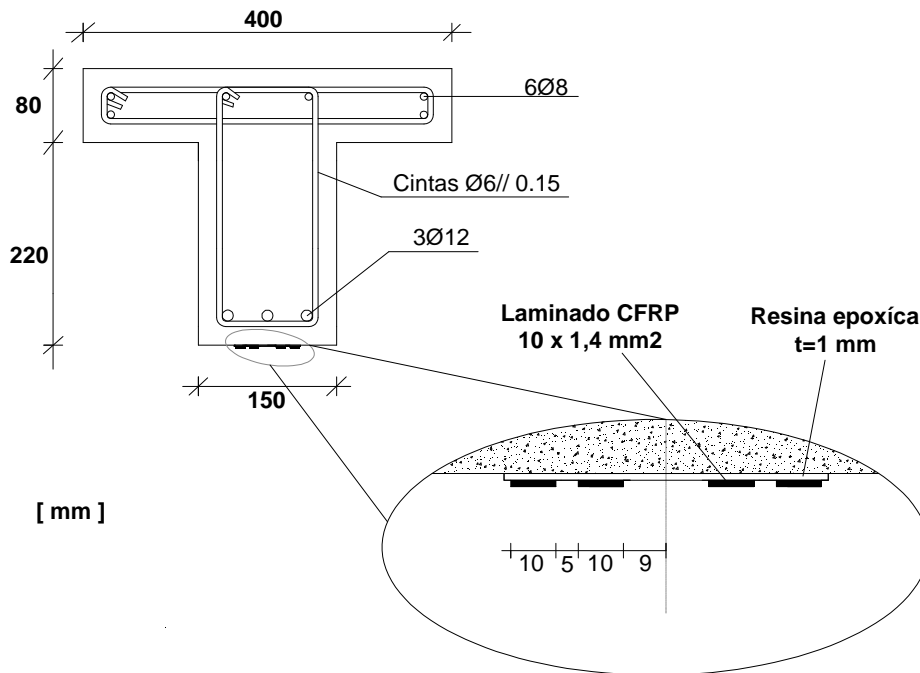


Figura 4.10: Secção transversal de meio-vão da viga reforçada com a técnica EBRA

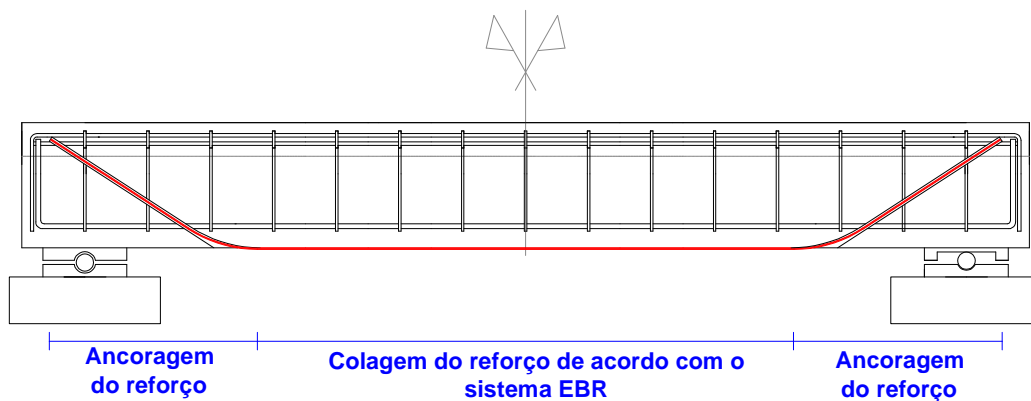


Figura 4.11: Sistema de ancoragem do material de reforço ao elemento estrutural

A ancoragem das extremidades do material de reforço é conseguida com o auxílio das forças de compressão das escoras que se dirigem para os apoios.

Um pormenor a ter em conta é a rugosidade e o raio de curvatura da zona de entrada do furo de ancoragem do compósito de CFRP. Como é de esperar, esta será uma zona crítica no que toca ao aumento da fragilidade da fibra e consequente ocorrência de roturas prematuras na mesma. Como tal, no sentido de evitar efeitos indesejados e determinantes na ocorrência daquele tipo de roturas é importante que a transição se faça de forma suave evitando pontos e arestas aguçadas. Isto pode ser conseguido eliminando as referidas arestas através da execução de uma superfície curva baseada num arco com o maior raio possível. A Figura 4.12 mostra o pormenor da zona de transição para o furo onde será realizada a amarração do compósito de CFRP.

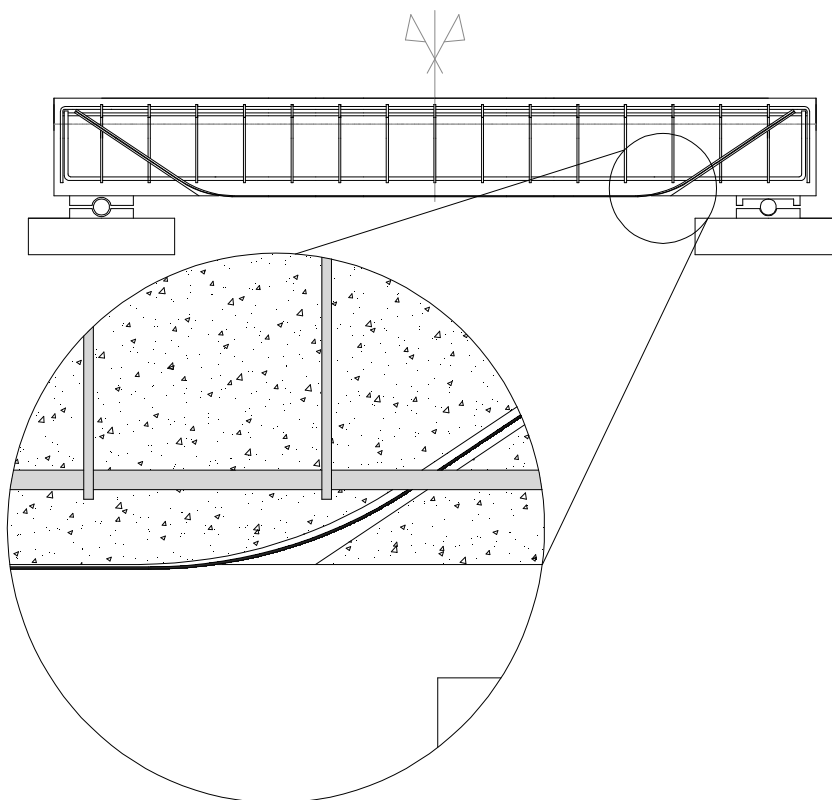


Figura 4.12: Pormenor do arco de transição para o furo de amarração

Para além das vantagens já descritas para a técnica EBR, o sistema com ancoragem do compósito de CFRP no interior do elemento estrutural anula um dos principais inconvenientes, característico da maioria das técnicas utilizadas atualmente e que diz respeito à não mobilização total da resistência à tração do material de reforço. O sistema EBRA procura assim evitar a ocorrência de mecanismos de colapso por perda de aderência da ligação Betão-Reforço como é comum acontecer com o sistema EBR e por destacamento do betão de recobrimento como se verifica em elementos reforçados com a técnica NSMR.

Com maior detalhe serão apresentados nos pontos seguintes os procedimentos de aplicação da técnica EBRA, bem como os materiais e acessórios utilizados para o efeito.

4.5.1.2 Procedimento construtivo

O faseamento construtivo adoptado para a técnica EBRA seguiu um conjunto de etapas que se procuram descrever ao longo deste ponto. Como tal, no que diz respeito a esta técnica de reforço, é possível resumir por ordem cronológica todas as etapas seguidas para a preparação dos modelos em estudo:

- 1º. Preparação da superfície de betão a reforçar com rebarbadora de disco apropriado;
- 2º. Verificação do posicionamento das armaduras transversais e longitudinais por forma a poder realizar os furos sem danificar as armaduras;
- 3º. Proceder à marcação dos pontos de furação, de acordo com o posicionamento das armaduras;
- 4º. Execução dos furos com berbequim;
- 5º. Limpeza dos furos com ar comprimido;
- 6º. Corte do laminado de CFRP com as dimensões previamente definidas e colagem dos extensómetros na superfície do mesmo;
- 7º. Limpeza do laminado de CFRP com acetona;
- 8º. Aplicação do adesivo epoxídico na parte inferior da viga e nos furos;
- 9º. Introdução do material CFRP nos respectivos furos e alinhamento do mesmo após a colagem à superfície de betão;
- 10º. Montagem do sistema adoptado para pressionar o laminado de CFRP contra a superfície de betão durante o período inicial de cura da resina epoxídica;
- 11º. Após um período de pelo menos 24 horas, proceder à desmontagem do sistema de pressão do laminado de CFRP contra a superfície de betão;
- 12º. Colocação da viga sobre os apoios ou em cima dos blocos de betão;
- 13º. Instrumentação da viga;
- 14º. Montagem da parte superior do sistema de ensaio e instrumentação da viga;
- 15º. Execução do ensaio, no mínimo, após oito dias de cura da resina epoxídica.

Nos pontos seguintes será explicado de uma forma mais detalhada todo o processo de execução da técnica EBRA que foi resumidamente descrita através dos tópicos anteriores.

4.5.1.2.1 Preparação da superfície do betão

Para que se verifique um correto desempenho da ligação FRP-Betão, principalmente no que respeita à transferência de tensões entre aqueles dois materiais, é de extrema importância um adequado tratamento das superfícies de betão onde será aplicado o reforço.

Sendo a técnica EBRA um sistema que deriva da técnica EBR no que diz respeito à forma como o material de reforço é colado ao elemento estrutural, a preparação da superfície de betão pode ser feita através da remoção da camada superficial de betão com a ajuda de jacto de areia, martelos de agulhas, rebarbadora, ou outros acessórios.

Tendo como objectivo a criação de uma superfície adequadamente rugosa para receber posteriormente o adesivo epoxídico e tendo em conta os acessórios disponíveis no laboratório de estruturas da Universidade Nova de Lisboa utilizou-se uma rebarbadora com um disco abrasivo próprio para a decapagem e limpeza de pedra (Figura 4.13).



Figura 4.13: Decapagem da superfície de betão

De forma a remover todos os detritos resultantes do processo de decapagem da superfície de betão com a rebarbadora, foi necessário proceder à limpeza da superfície com a ajuda de uma pistola de ar comprimido. De modo a não comprometer as condições de aplicabilidade e correto desempenho do agente de aderência, foi também assegurado que a mesma superfície não continha outro tipo de sujidade nomeadamente manchas de gordura, ou outras que não tenham sido removidas com o ar comprimido. Com esta ultima operação a superfície do elemento a reforçar ficou então pronta para receber o agente de colagem dos compósitos de CFRP ao betão.

4.5.1.2.2 Execução dos furos de amarração do CFRP

Uma das fases mais importantes no procedimento construtivo da técnica em estudo é a execução dos furos de amarração do material de reforço, devendo evitar-se a interferência com as armaduras ordinárias. Outro aspecto relevante no dimensionamento dos furos de amarração do CFRP é o ângulo que estes fazem com a horizontal. Como já foi referido, para a correta amarração interessa que os furos intersectem a linha de ação da escora de compressão que se dirige para os apoios. Como tal, consoante a distribuição das armaduras ordinárias e a zona admissível para ancorar o CFRP determina-se o ângulo de inclinação (β) do furo que deverá fazer um ângulo compreendido entre $21,8^\circ$ a 45° , relativamente ao eixo da viga, de acordo com o Eurocódigo 2 [69] (Figura 4.14). No caso das vigas estudadas adoptou-se um ângulo de aproximadamente 33° .

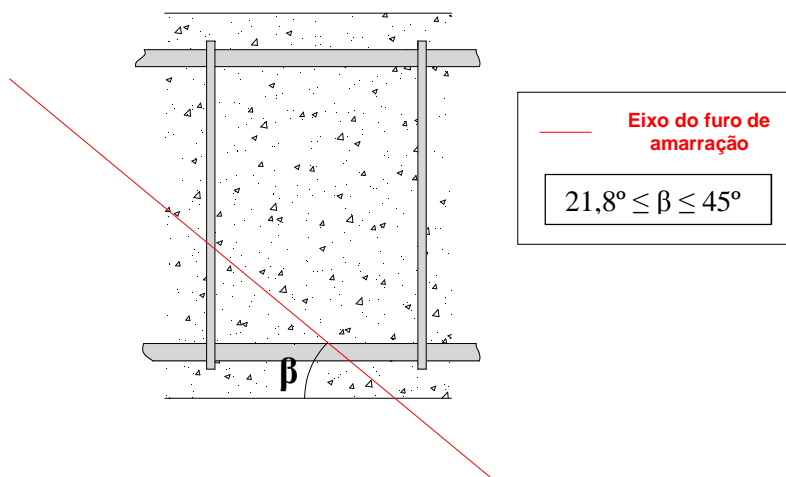


Figura 4.14: Inclinação dos furos de amarração

Outro parâmetro determinante na economia dos sistemas de reforço em estudo é a determinação do menor comprimento de amarração possível a adoptar. Contudo, neste estudo não se entrou em linha de conta com esse parâmetro, tendo-se adoptado o maior valor possível atendendo à geometria da viga e ao posicionamento das armaduras ordinárias. Como tal, o comprimento dos furos foram de 47 centímetros.

Com base nas condicionantes já mencionadas anteriormente, no que toca às zonas de transição para o furo de amarração do CFRP, optou-se por adoptar um raio de 30 centímetros.

Para a determinação da zona admissível de execução dos furos de amarração do CFRP, recorreu-se à análise dos diagramas trapezoidais da força na cedência das armaduras ordinárias e na rotura do CFRP ao longo do comprimento da viga. A zona referida corresponde então à distância compreendida entre o ponto situado a d do apoio e o local a partir do qual a absorção da força aplicada pode ser garantida apenas pelas armaduras longitudinais de tração.

Para determinar o valor máximo do diagrama de forças referido no momento da cedência das armaduras longitudinais, recorreu-se à Eq.4.1. Somando o valor máximo do diagrama anterior ao valor correspondente à contribuição do material CFRP determinado com a Eq.4.2, obteve-se o respectivo valor máximo do diagrama de forças na rotura do compósito de CFRP (Figura 4.15).

$$F_y = \frac{M_{y,REF}}{0,9 \cdot d} \quad (4.1)$$

$$F_{CFRP} = \varepsilon_f \cdot E_f \cdot A_f \quad (4.2)$$

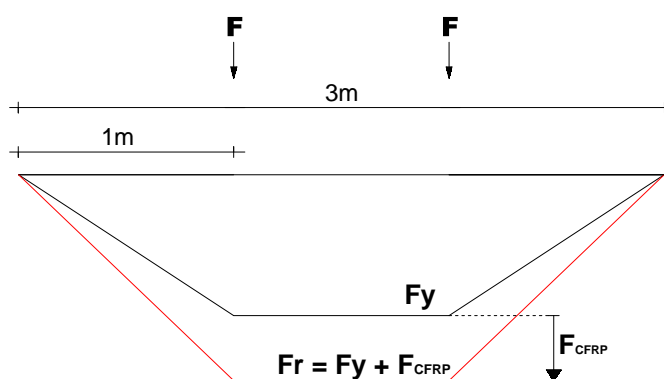


Figura 4.15: Diagrama de forças estimado no instante da cedência das armaduras e da rotura do CFRP

Através da sobreposição dos dois diagramas de forças e recorrendo ao método da semelhança de triângulos foi possível determinar a zona admissível para realizar os furos de amarração do CFRP. Com base nos cálculos efectuados, a zona admissível para realizar os furos de amarração ficou definida desde a distância d do apoio (274 milímetros) até 654 milímetros contados a partir do mesmo (Figura 4.16).

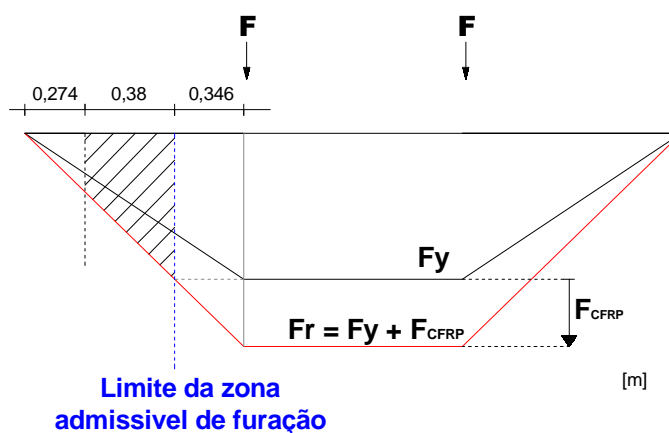


Figura 4.16: Zona admissível para execução dos furos de amarração

Estando os furos devidamente dimensionados, procedeu-se já em laboratório e com a ajuda do equipamento de detecção de varões de aço da HILTI (*PS 200 Ferrosan System*) à verificação da posição das armaduras nas vigas estudadas. Esta operação não deve deixar de ser executada pois, em obra, pode ser frequente a existência de armaduras incorretamente posicionadas no elemento de betão. No caso dos modelos estudados constatou-se que grande parte dos respectivos varões longitudinais não se encontravam posicionados de acordo com o projeto, fazendo justificar a importância desta operação. Aferido o posicionamento das armaduras, procedeu-se de seguida à marcação dos pontos de furação. Como foram utilizados quatro laminados de CFRP para a técnica EBRA optou-se por distribuir os furos dois a dois e segundo duas linhas, ambas dentro da zona admissível para a furação e distanciadas do apoio de 309 e 453 milímetros respectivamente. A Figura 4.17 mostra a disposição dos furos em relação à posição dos varões longitudinais para a técnica EBRA.

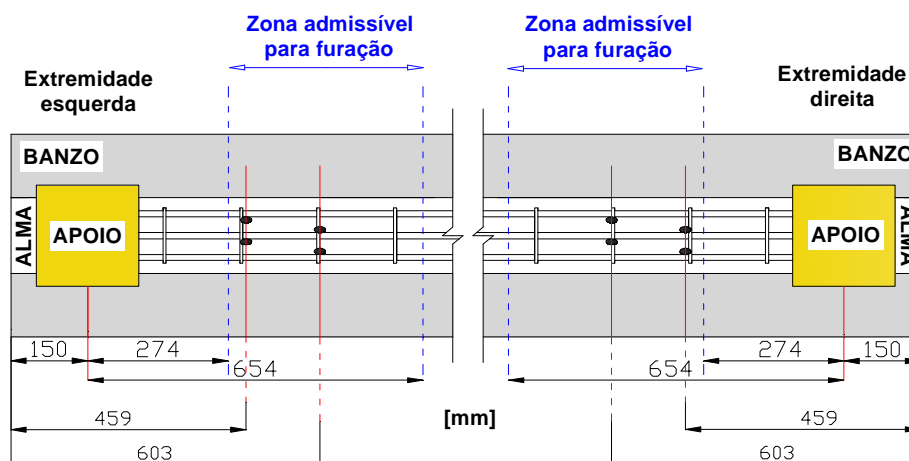


Figura 4.17: Vista inferior das duas extremidades de uma das vigas estudadas e posicionamento dos furos em relação aos varões longitudinais

Antes da execução dos furos posicionou-se o guia de furação (Figura 4.18) concebido para o efeito, alinhando-o com as marcas feitas previamente na viga.

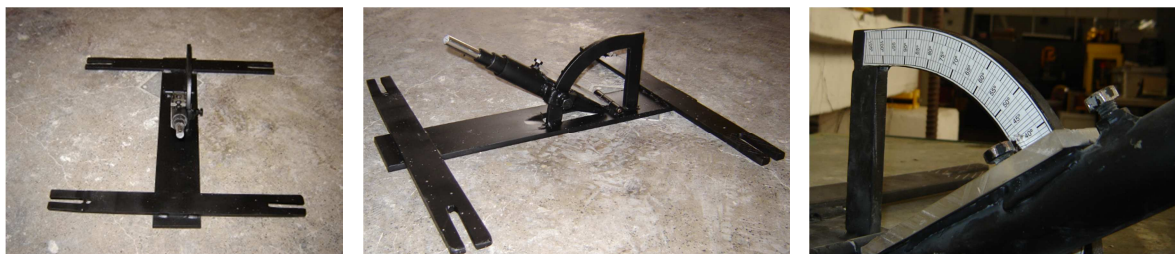


Figura 4.18: Guia de furação adotado

Com o auxílio de um berbequim com uma broca de diâmetro de 12 milímetros procedeu-se à furação da viga até ser alcançada a profundidade pretendida (Figura 4.19). Posteriormente à desmontagem do guia de furação limpou-se o interior do furo com o auxílio de um escovilhão e uma pistola de ar comprimido ligada a um tubo de comprimento suficiente para alcançar o fundo do furo (Figura 4.20).



Figura 4.19: Furação com broca de diâmetro de 12 milímetros

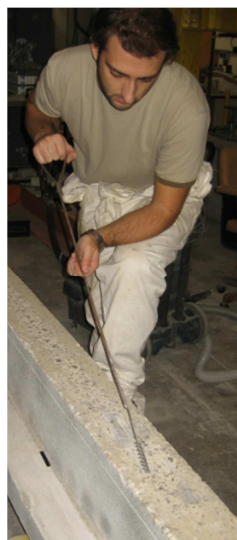


Figura 4.20: Limpeza dos furos com escovilhão (à esquerda) e com ar comprimido (à direita)



Por fim, com um escopro encaixado num berbequim procedeu-se à eliminação das arestas na superfície de transição para o furo de amarração, tendo em conta o raio adoptado inicialmente (Figura 4.21). Refira-se que à medida que esta operação era executada foi importante proceder à limpeza da zona intervencionada com ar comprimido.



Figura 4.21: Execução das zonas de transição para os furos de amarração do CFRP



Figura 4.22: Aspecto final dos furos de amarração do CFRP

4.5.1.2.3 Colagem dos extensómetros nos laminados de CFRP

Para a obtenção dos dados relativos à extensão ao longo do comprimento do composto de CFRP foi utilizado um conjunto de extensómetros colados em pontos específicos, tal como será descrito no ponto destinado à instrumentação e aquisição de dados.

Tendo em conta que foram utilizados laminados de CFRP, foi necessário seguir as seguintes etapas para a colagem dos extensómetros nos referidos elementos de reforço.

Inicialmente, procedeu-se à marcação dos pontos específicos do laminado nos quais se pretendia obter a leitura das extensões aquando da realização do ensaio (Figura 4.23).

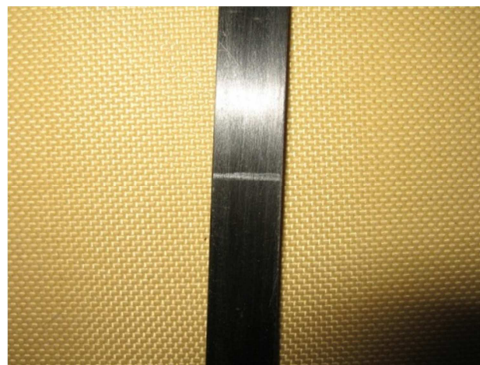


Figura 4.23: Marcação do laminado

Posteriormente, de forma a minimizar o risco de contacto entre os fios dos extensómetros e o CFRP e de modo a criar uma superfície isolada para o apoio dos referidos fios, foi colada uma fita adesiva com as dimensões adequadas junto à marcação do ponto de colagem feita anteriormente (Figura 4.24).

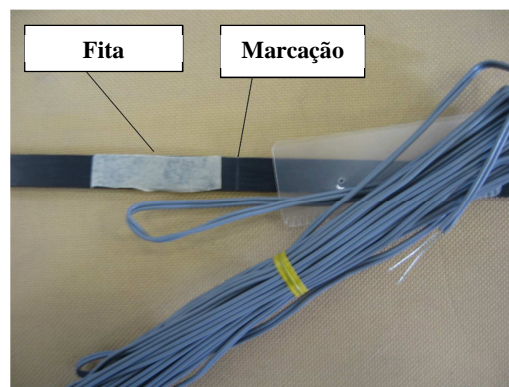


Figura 4.24: Colagem da fita adesiva

Antes da aplicação da cola foi importante separar cuidadosamente os dois fios dos extensómetros evitando desta forma o contacto entre ambos após a sua instalação (Figura 4.25).

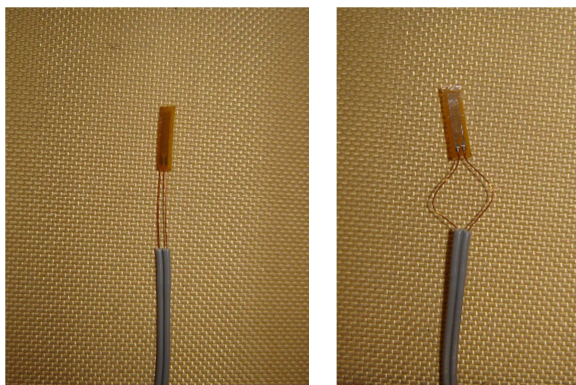


Figura 4.25: Fios dos extensómetros separados

Terminada esta etapa, procedeu-se à aplicação da cola identificando cuidadosamente a zona do extensómetro onde esta deverá ser aplicada. A referida zona corresponde à parte traseira da base do extensómetro cuja tonalidade se verifica opaca (Figura 4.26).



Figura 4.26: Aplicação da cola

A colagem do extensómetro deverá ser realizada com a ajuda de folhas de polietileno fornecidas nas embalagens juntamente com os extensómetros. Colocando a folha de polietileno sobre o extensómetro e pressionando-o durante aproximadamente um minuto (de acordo com o tempo de cura e restantes características do material de colagem) é então finalizada a operação de colagem dos extensómetros ao laminado de CFRP (Figura 4.27). Refira-se que antes de posicionar o extensómetro com a cola na face do laminado, foi necessário proceder à limpeza deste com algodão e acetona.

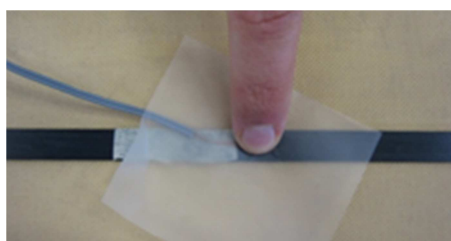


Figura 4.27: Auxílio da folha de polietileno na operação de colagem do extensómetro

Com o objectivo de evitar os riscos associados à tração dos fios dos extensómetros devido ao tensionamento do CFRP no decorrer do ensaio foi importante fixar os mesmos ao próprio material

de reforço, como mostra a Figura 4.28. Esta fixação pode ser feita com o auxílio de qualquer tipo de material desde que os extensómetros não sejam danificados. Neste caso foi utilizado para o efeito cola quente.

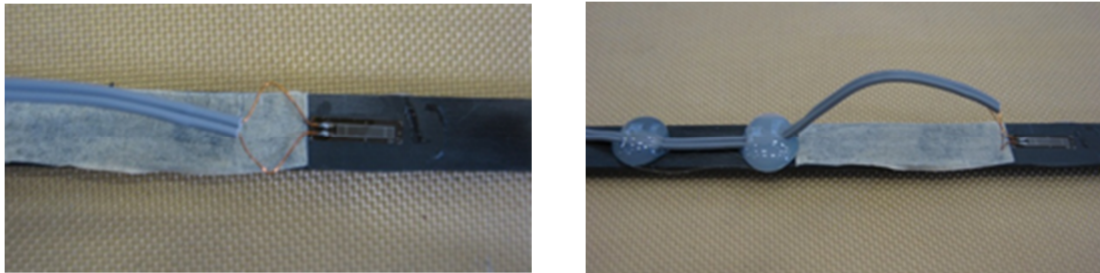


Figura 4.28: Fixação dos fios do extensómetro ao laminado CFRP

Por fim, com o intuito de isolar e impermeabilizar todo este sistema, foi pulverizada com um *spray* isolante de componentes eléctricos toda a zona intervencionada.

Para a correta identificação dos extensómetros foi ainda necessário proceder à numeração dos mesmos, tal como mostram os esquemas apresentados no Apêndice A

4.5.1.2.4 Aplicação do agente adesivo e do CFRP

Como já foi mencionado no respectivo capítulo da caracterização dos materiais, os adesivos utilizados foram as resinas epoxídicas S&P 220 e HILTI HIT-RE 500. Ambas são compostas por dois componentes que misturados funcionam como agentes de colagem do CFRP ao elemento de betão armado. Ao contrário da resina HILTI HIT-RE 500 cuja mistura é feita com a ajuda de um dispensador (ED 3500) da mesma marca, próprio para o efeito (Figura 4.29), a mistura da resina S&P 220 fez-se de forma manual numa proporção de peso de 4:1 (A:B) (Figura 4.30).



Figura 4.29: Dispensador ED3500



Figura 4.30: Mistura da resina S&P220

É importante referir que a resina adoptada para a colagem do CFRP na superfície de betão na técnica EBRA, foi a resina S&P220. Com a necessidade de comparar o comportamento aderente do material de reforço no interior dos furos de amarração com diferentes tipos de resina epoxídica utilizou-se a resina HILTI HIT-RE 500 em metade dos furos e a resina S&P 220 nos restantes.

No caso da técnica EBRA, a aplicação da resina S&P220 na superfície da viga foi iniciada com a colagem de uma fita isoladora ao longo do comprimento da base da viga com o objectivo de limitar a zona onde a resina deveria ser espalhada (Figura 4.31). Terminada esta operação, introduziram-se as resinas nos respectivos furos assegurando que o enchimento dos mesmos era feito a partir do fundo para que não se formassem bolhas de ar. A introdução da resina HILTI HIT-RE 500 (Figura 4.32) foi feita, como já se mencionou, com o dispensador composto por um tubo com as dimensões adequadas para os furos. No caso da resina S&P220 foi improvisado um sistema baseado nas bisnagas cilíndricas correntes de injeção de silicone, igualmente ligado a um tubo com as dimensões compatíveis com os furos de amarração (Figura 4.33).



Figura 4.31: Colagem da fita adesiva na base da viga



Figura 4.32: Introdução da resina HILTI HIT-RE 500 com o dispensador ED3500

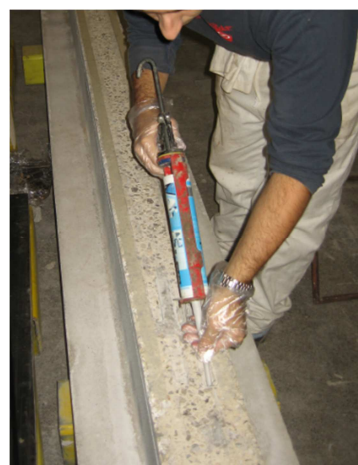


Figura 4.33: Introdução da resina S&P220 com o sistema improvisado de injeção

Como mostra a Figura 4.34 as resinas foram introduzidas nos furos de forma alternada, ou seja, cada tipo de resina preenchia um conjunto de dois furos de extremidade e outro conjunto de dois furos intermédios. Sem perder demasiado tempo, evitando o risco de se esgotar o tempo de utilização (*pot life*) indicado pelos fabricantes das resinas, com o auxílio de uma espátula a resina S&P220 foi espalhada ao longo da superfície de betão, procurando manter constante a espessura adequada para o tipo de colagem (aproximadamente 1 mm) (Figura 4.35).

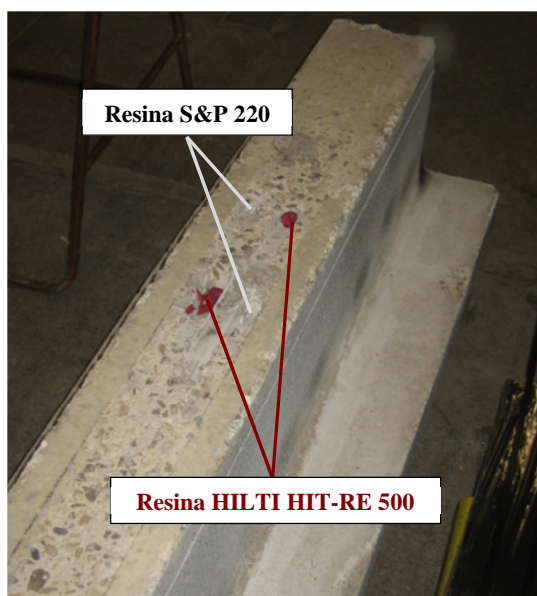


Figura 4.34: Aspecto final dos furos preenchidos com as resinas utilizadas



Figura 4.35: Aplicação da resina S&P220 na superfície da viga

De seguida, igualmente tentando respeitar o *pot life* das resinas utilizadas, procedeu-se à introdução dos laminados de CFRP nos respectivos furos, pressionando de imediato os mesmos contra a superfície de betão nas zonas intermédias da viga. Sobre a superfície intervencionada colocou-se um conjunto de perfis e elementos metálicos com o objectivo destes exercerem pressão nos laminados contra a superfície de betão durante a cura das resinas (Figura 4.36). Um pormenor bastante importante e determinante para o correto desempenho das funções do reforço é o cuidado que se deve ter em manter os laminados de CFRP devidamente alinhados ao longo do comprimento do elemento, tanto durante a operação de colagem como durante o tempo de cura das resinas. Refira-se que este foi o método utilizado em laboratório, no entanto em obra ter-se-á de utilizar um outro método que produza o mesmo efeito.



Figura 4.36: Cura das resinas

Finalmente, após um período de pelo menos 24 horas, retiraram-se os elementos que pressionavam os laminados de CFRP contra a superfície de betão e colocou-se a viga sobre os apoios, no local do ensaio. Desta forma, a viga ficou pronta para ser instrumentada e posteriormente ensaiada. A Figura 4.37 mostra o aspecto final de um laminado amarrado no interior de um furo preenchido com resina S&P220.

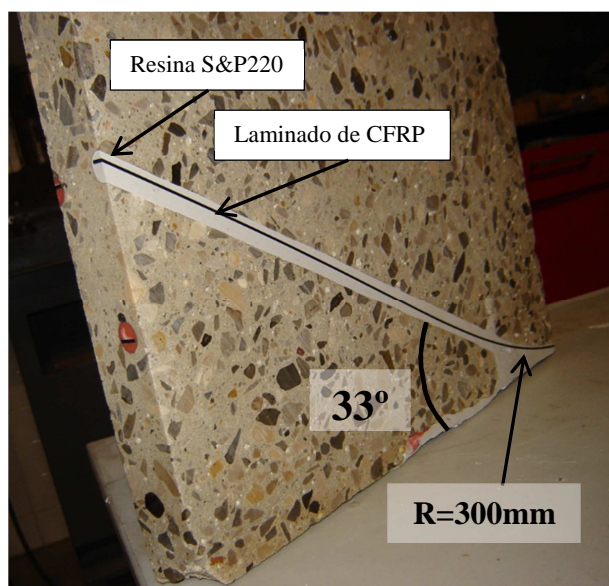


Figura 4.37: Laminado de CFRP ancorado no interior de um furo

4.5.2 Técnica HNSMR

4.5.2.1 Considerações gerais

A técnica *Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement* (HNSMR) consiste na introdução dos elementos de reforço em rasgos previamente realizados nas faces laterais da alma da viga a reforçar (Figura 4.38). No sentido de ancorar o reforço, este é colocado ao longo do comprimento total da viga, aproveitando assim os esforços de compressão existentes na zona dos apoios da mesma (Figura 4.39) aquando do carregamento. Tal como os modelos reforçados com a técnica EBRA, o material de reforço utilizado foram elementos de fibra de carbono (CFRP) em formato de laminado.

Nesta técnica, tal como no sistema EBRA, pretende-se minimizar os inconvenientes observados em elementos reforçados com as técnicas EBR e NSMR. O sistema HNSMR é baseado na variante de rasgos horizontais da técnica NSMR. Tendo sido esta técnica já testada por autores como Juvandes [71] e Barbosa [72] em vigas de madeira lamelada colada, é então no âmbito deste trabalho que a mesma será aplicada e estudada nas duas vigas disponíveis em betão armado.

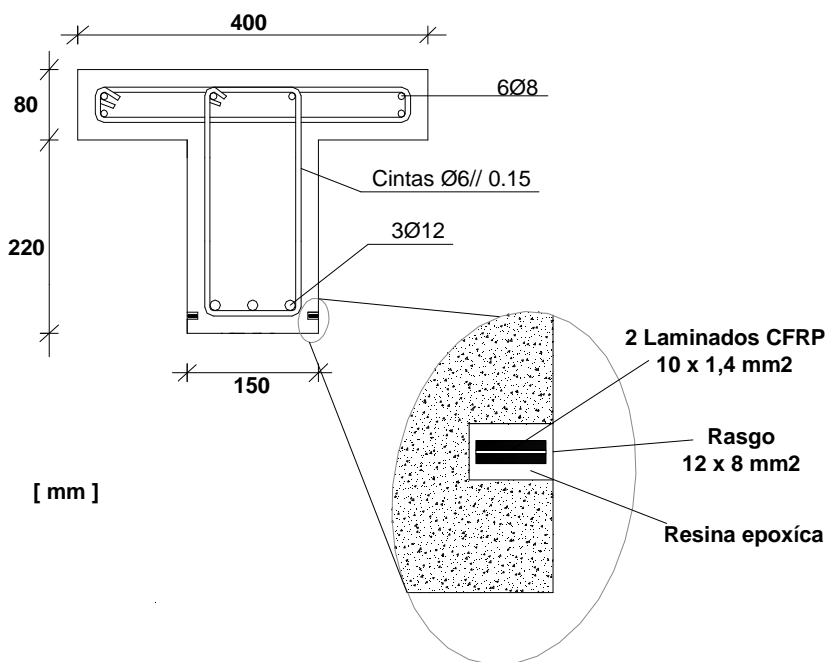


Figura 4.38: Secção transversal de meio-vão da viga reforçada com a técnica EBRA

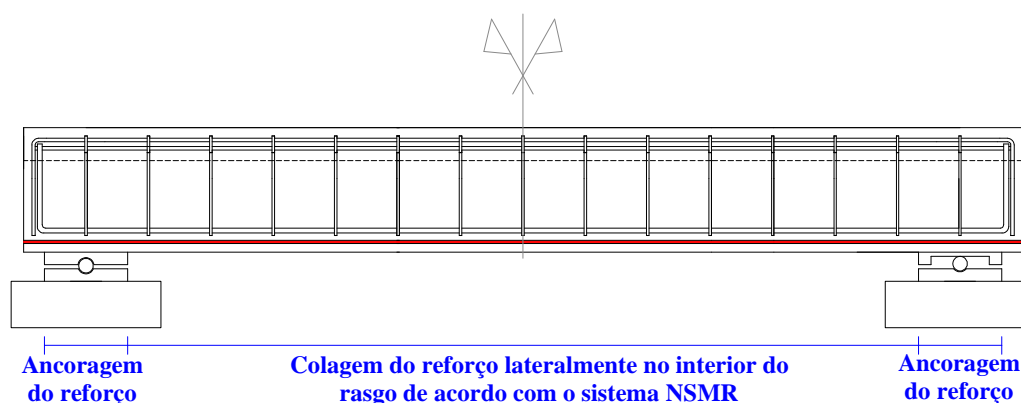


Figura 4.39: Sistema de ancoragem do material de reforço ao elemento estrutural

Para além das vantagens comuns do sistema NSMR, nomeadamente a economia ou a maior proteção à ação dos agentes externos, a técnica HNSMR pode ser aplicada em vigas interiores de forma rápida e simples, sem que seja necessário qualquer tipo de preparação da superfície de betão a reforçar. Para além disto, procurar-se-á que este método de reforço possa também impedir a ocorrência de mecanismos de colapso indesejáveis, dos quais se salientam a perda de aderência da ligação Betão-Reforço ou mesmo o destacamento do betão de recobrimento, ambos responsáveis pelo não aproveitamento da resistência total do compósito de CFRP utilizado no respectivo reforço.

Através dos pontos seguintes, são descritas as etapas seguidas no processo de aplicação da técnica HNSMR, fazendo sempre alusão ao equipamento e materiais utilizados para o efeito.

4.5.2.2 Procedimento construtivo

No que diz respeito à técnica de reforço HNSMR estudada no âmbito deste trabalho, foram seguidas em laboratório um conjunto de etapas que de forma resumida se enumeram da seguinte forma:

- 1º. Corte e preparação do laminado de CFRP com as dimensões previamente definidas;
- 2º. Verificação do posicionamento e localização das armaduras ordinárias;
- 3º. Marcação do posicionamento do rasgo;
- 4º. Abertura dos rasgos em cada face lateral da alma da viga com uma serra elétrica com disco de corte, próprio para o efeito;
- 5º. Limpeza dos rasgos e das zonas envolventes aos mesmos com ar comprimido;
- 6º. Colocação da viga sobre os apoios previamente posicionados sobre os blocos de betão;
- 7º. Limpeza do material CFRP com acetona e colagem dos extensómetros na superfície do mesmo;

- 8°. Preenchimento dos rasgos com adesivo epoxídico;
- 9°. Introdução do laminado de CFRP nos respectivos rasgos, retirando de seguida o excesso de adesivo epoxídico;
- 10°. Após um período de cura da resina epoxídica de pelo menos 24 horas, montagem da parte superior do sistema de ensaio;
- 11°. Instrumentação da viga;
- 12°. Execução do ensaio, no mínimo, após oito dias de cura da resina epoxídica.

Os pontos seguintes procuram descrever, com mais detalhe, as etapas do processo de aplicação da técnica HNSMR que foram enumeradas anteriormente.

4.5.2.2.1 Preparação dos laminados de CFRP

Antes de se proceder à abertura dos rasgos na viga, procedeu-se primeiro à preparação dos laminados de CFRP. Atendendo a que esta técnica de reforço admite dois rasgos, um em cada face lateral da alma da viga em estudo, e que os laminados de CFRP já descritos e caracterizados neste trabalho faziam parte do único material de reforço disponível, optou-se por introduzir dois laminados de CFRP por cada rasgo, a fim de se conseguir a mesma quantidade de reforço em todos os modelos de vigas estudados neste trabalho. Tal decisão foi tomada para que eventuais diferenças de comportamento ou resultados dos modelos testados estivessem apenas associadas ao diferente sistema ou técnica de reforço aplicada.

Como tal, foram inicialmente cortados os quatro laminados de CFRP utilizados no reforço, cada um com 3,3 metros de comprimento. Por forma a facilitar posteriormente a introdução dos elementos de reforço nos rasgos preenchidos com adesivo epoxídico, optou-se por colar cada conjunto de dois laminados de CFRP através da mesma resina utilizada para preencher os respectivos rasgos (S&P 220). Desta forma, antes de se iniciar a operação de abertura dos rasgos, procedeu-se à colagem dos quatro laminados de CFRP em conjuntos de dois. O resultado final desta colagem pode ser observado pela Figura 4.40.

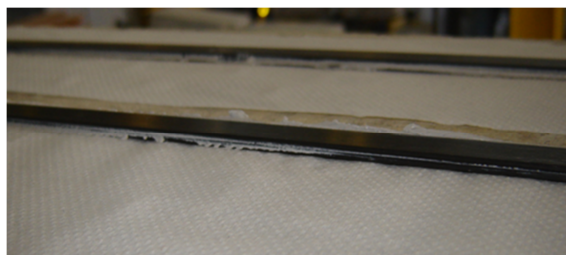


Figura 4.40: Pormenor dos laminados logo após a colagem

4.5.2.2.2 Abertura dos rasgos

Antes de proceder à abertura dos rasgos é importante definir adequadamente o local onde estes serão executados. Por um lado, o valor do momento resistente da viga dependerá da posição adoptada para a colocação do reforço na alma, e por outro, tendo em conta a profundidade dos rasgos é importante ter a certeza que a abertura dos mesmos não põe em causa a integridade das armaduras de esforço transverso ou qualquer outro elemento que contribua para a resistência do elemento estrutural. Desta forma, procedeu-se à verificação da posição das armaduras com a ajuda do mesmo equipamento de detecção de varões de aço utilizado na técnica EBRA (HILTI – *PS200 Ferrosan System*).

Contudo, atendendo ao facto das vigas em estudo apresentarem um recobrimento, na base, maior do que o esperado (cerca de 3,6 centímetros), optou-se por experimentar a abrir os rasgos em duas posições diferentes. Assim, os rasgos da viga V9 (carregamento monotónico) ficaram posicionados abaixo das armaduras longitudinais de tração (a 2,5 centímetros da base da viga), enquanto na viga V10 (carregamento cíclico) os mesmos foram abertos ao mesmo nível dos varões de aço da armadura longitudinal. Atendendo à espessura total dos dois laminados de CFRP, adoptou-se 0,8 centímetros para a dimensão média de abertura do rasgo lateral na viga.

Tendo sido feita a marcação da posição dos rasgos nas faces laterais da alma da viga, procedeu-se de seguida à abertura dos mesmos através de uma serra eléctrica com um disco de corte próprio para o efeito (Figuras 4.41 e 4.42).



Figura 4.41: Abertura dos rasgos na face lateral da alma da viga



Figura 4.42: Serra eléctrica utilizada para a abertura dos rasgos

Para terminar esta etapa, e antes de se colocar a viga sobre os apoios procedeu-se à limpeza dos rasgos e das zonas envolventes aos mesmos com ar comprimido.

4.5.2.2.3 Colagem dos extensómetros no CFRP

Após uma adequada limpeza dos laminados de CFRP utilizados no reforço do modelo V9 com a ajuda de algodão e acetona, procedeu-se à colagem dos extensómetros ao longo da face inferior do laminado inferior introduzido em cada rasgo, em pontos específicos e determinados com base nos resultados dos modelos anteriormente ensaiados. Tal como é justificado no ponto destinado à instrumentação e aquisição de dados, optou-se por distribuir todos os extensómetros utilizados ao longo de um dos laminados de CFRP, excepto um que foi colado exactamente a meio vão do outro laminado de CFRP.

Pelo facto do processo de colagem dos extensómetros ter seguido as mesmas etapas já descritas na técnica EBRA, estas não serão enumeradas neste ponto.

Refira-se ainda que no Apêndice A é apresentado o esquema da distribuição dos extensómetros adoptada para os laminados de CFRP que reforçam os modelos V9 e V10.

4.5.2.2.4 Aplicação do agente adesivo e do CFRP

Nos modelos V6, V7 e V8, não se detectou qualquer anomalia no comportamento aderente do compósito de CFRP ao betão proporcionado pelos adesivos epoxídicos utilizados, pelo que nas vigas V9 e V10 se optou por utilizar como agente de colagem apenas um adesivo epoxídico dos dois já aplicados. Tendo em conta que a resina S&P 220 se mostrou a mais indicada para aplicar neste tipo de técnicas de reforço devido à sua maior viscosidade, decidiu-se que esta seria a resina utilizada na técnica HNSMR.

Deste modo, procedeu-se à mistura dos componentes A e B já referenciados anteriormente, numa proporção de peso de 4 para 1, respectivamente. Com o auxílio do sistema de injeção utilizado anteriormente, os rasgos foram preenchidos com a resina S&P 220. Ao longo desta operação foi-se verificando que os rasgos eram totalmente preenchidos, evitando a existência de espaços vazios ou bolhas de ar que pudessem comprometer o correto funcionamento do agente em causa.

Feito o preenchimento dos rasgos com resina epoxídica, introduziram-se os laminados ranhuras, tendo o cuidado especial de manter devidamente alinhados os laminados no interior do elemento de betão em estudo.

Posteriormente a esta operação, com a ajuda de uma espátula, foi necessário retirar o excesso de resina que entretanto saiu do interior do rasgo e com o mesmo utensílio nivelar devidamente a zona intervencionada. Após 24 horas da aplicação do reforço, foi então montada a parte superior do sistema de ensaio, e desta forma a viga ficou preparada para ser instrumentada, tal como será descrito nos pontos seguintes.

As Figuras 4.43 e 4.44 mostram, respectivamente, a operação de nivelamento da superfície intervencionada na fase final da aplicação do reforço e o aspecto final do modelo da viga V9 já reforçada.



Figura 4.43: Aplicação do adesivo epoxídico e nivelamento da superfície intervencionada



Figura 4.44: Aspecto final do modelo V9 reforçado

4.6 Instrumentação e aquisição de dados

Todas as vigas ensaiadas foram igualmente instrumentadas com extensómetros, transdutores de deslocamento e células de carga, tendo por objectivo a aquisição dos dados relativos às extensões, forças aplicadas, curvaturas e deslocamentos. Nos pontos seguintes faz-se a descrição pormenorizada da instrumentação efectuada.

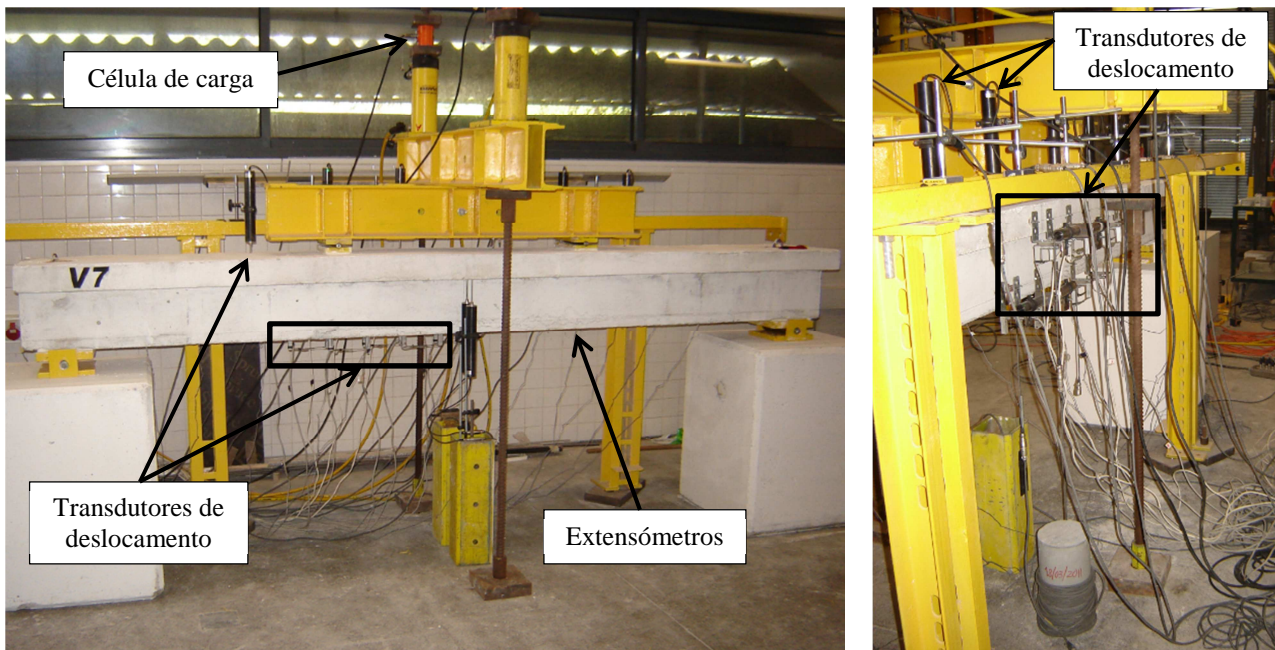


Figura 4.45: Vista frontal (à esquerda) e posterior (à direita) da viga instrumentada

4.6.1 Extensómetros

Para a medição de toda a informação pretendida, no que respeita aos valores de extensões tanto nas armaduras ordinárias como no laminado de CFRP, foram instalados em pontos previamente definidos trinta e sete extensómetros no modelo V6, catorze extensómetros nos modelos V7 e V8 e treze extensómetros no modelo V9.

Para o controlo das extensões nas armaduras ordinárias foram utilizados em todas as vigas três extensómetros eléctricos de resistência (TML-FLA-5-11) instalados aquando da preparação das mesmas. No sentido de registar todo o historial de deformação das armaduras longitudinais ao longo dos ensaios e desta forma contribuir para a identificação dos diversos patamares característicos do desempenho do aço das mesmas armaduras, foram posicionados dois extensómetros na zona de meio-vão das vigas. Com semelhante objectivo mas, por outro lado, para o controlo do esforço transversal foi colocado um extensómetro no estribo mais próximo da distância d do apoio, medida a partir da posição do mesmo. A Figura 4.46 mostra o pormenor da instrumentação das armaduras ordinárias dos modelos em estudo.

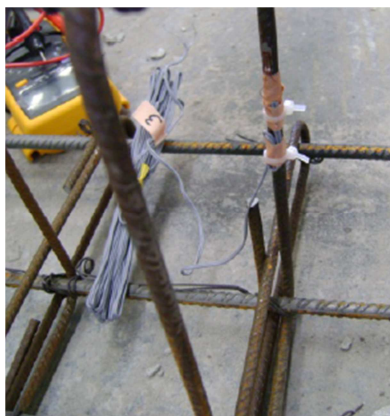


Figura 4.46: Colagem dos extensômetros nas armaduras ordinárias [3]

Ao nível do laminado de CFRP dos modelos V7 e V8 foram colados, segundo as etapas já descritas anteriormente, onze extensômetros (TML-BFLA-5-8) distribuídos ao longo do comprimento do referido elemento de CFRP (Figura 4.48). Devido à novidade da técnica e ao maior desconhecimento do desempenho do compósito de CFRP perante o sistema de reforço utilizado, houve a necessidade de distribuir no primeiro modelo ensaiado (V6) um maior número de extensômetros. Como tal, foram utilizados trinta e quatro extensômetros, distribuídos por dois dos quatro laminados de CFRP, ao longo do comprimento dos mesmos (Figura 4.47). Relativamente à instrumentação do material de reforço das vigas V9 e V10, foram colados dez extensômetros distribuídos ao longo de um dos laminados de CFRP e outro extensômetro colado na posição de meio vão do outro laminado de CFRP (Figura 4.49).

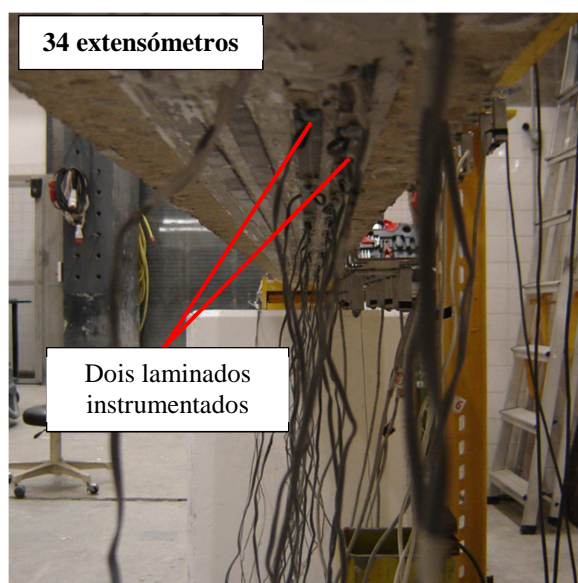


Figura 4.47: Instrumentação dos laminados do modelo V6

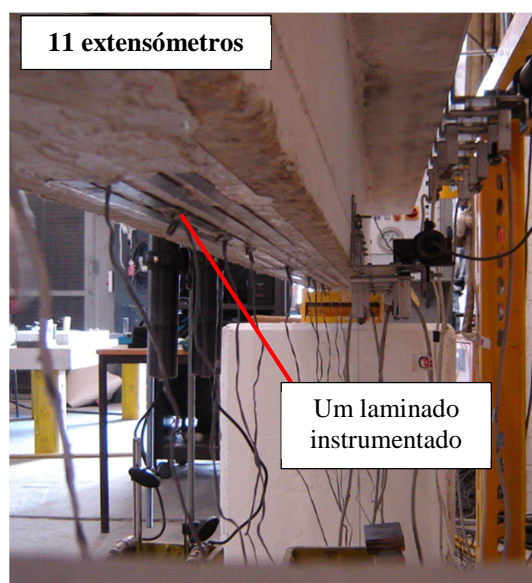


Figura 4.48: Instrumentação dos modelos V7 e V8 num dos laminados

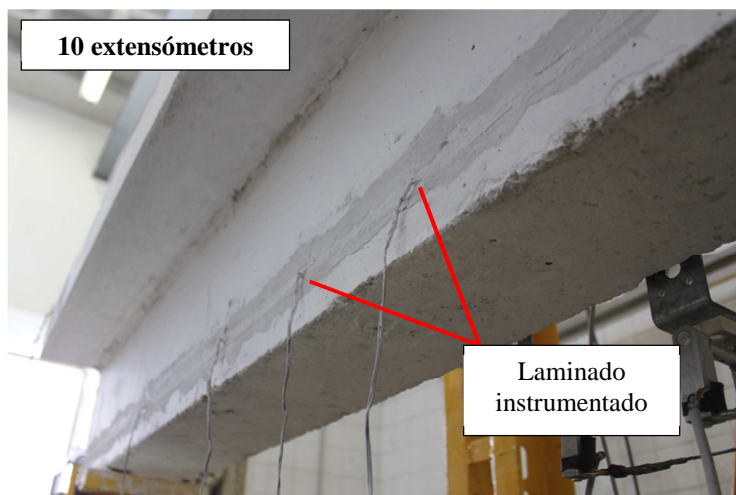


Figura 4.49: Instrumentação dos laminados dos modelos V9 e V10

Refira-se ainda que o meio vão das vigas ou mesmo os locais de formação de possíveis rótulas plásticas no decorrer dos ensaios foram consideradas zonas prioritárias para instrumentação dos laminados de CFRP. As zonas de transição para a ancoragem dos laminados de CFRP das vigas V6, V7 e V8, foram também tidas em conta na instrumentação dos laminados de CFRP. Resta apenas mencionar que os restantes extensómetros colados fora das zonas anteriormente referidas foram utilizados apenas para que não se verificassem zonas do compósito de CFRP com grandes comprimentos não instrumentados.

No Apêndice A encontra-se esquematizado o posicionamento e a numeração adoptada para os extensómetros colados tanto nos laminados de CFRP como nas armaduras ordinárias, para cada modelo estudado.

4.6.2 Transdutores de deslocamento

Para a quantificação dos deslocamentos verticais ao longo da viga foram utilizados oito transdutores de deslocamento (LVDT).

Sete dos oito eram transdutores TML-CDP100 com um curso total de 100 milímetros e uma sensibilidade de 5.0 mV/v . Todos estes transdutores de deslocamento foram posicionados e alinhados na superfície do banzo das vigas através de varões roscados que por sua vez eram ligados à parte da estrutura metálica pertencente ao sistema de ensaio por intermédio de dispositivos de base magnética (Figura 4.50).



Figura 4.50: Transdutores de deslocamento TML-CDP100 alinhados na superfície da viga

Aos sete transdutores de deslocamento descritos anteriormente, juntou-se outro (TML-DP-500E) com um curso de 500 milímetros (Figura 4.51), fixo a meio vão da viga e aproximadamente a 6 centímetros da base da mesma. Este é constituído por um fio extensível que é preso no ponto de leitura desejado, a partir do qual são lidos os valores de deslocamento pretendidos. Refira-se que apesar de este transdutor recolher valores ao longo de todos os ensaios, a sua principal função prendeu-se essencialmente pela leitura dos deslocamentos na fase de pós-rotura do sistema.



Figura 4.51: Transdutor de deslocamento TML-DP-500E com o fio recolhido para o interior da caixa do mesmo

No sentido de controlar o escorregamento dos laminados de CFRP no interior dos rasgos dos modelos V9 e V10, foram utilizados dois transdutores de deslocamento TML-CDP50 com um curso total de 50 milímetros e uma sensibilidade de 5.0 mv/v , apoiados nas pontas de cada laminado de CFRP (Figura 4.52).

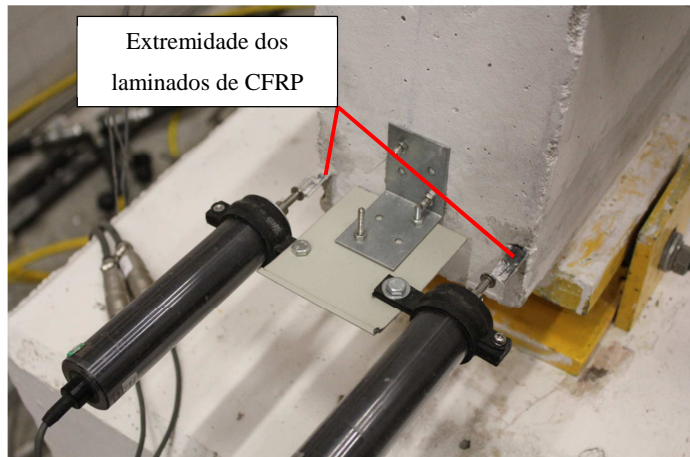


Figura 4.52: Transdutores de deslocamento TML-CDP50 encostados nas extremidades do CFRP dos modelos V9 e V10

Para a quantificação dos dados referentes às curvaturas médias das secções transversais ao longo do comprimento da viga foram utilizados dez transdutores de deslocamentos horizontais desenvolvidos para o efeito (Figura 4.53) [30]. A estrutura destes é baseada num pequeno pórtico constituído por duas barras rígidas de alumínio e por uma chapa flexível em aço. Sobre esta, são colados quatro extensómetros dispostos dois a dois, a $1/3$ e $2/3$ do vão da mesma, formando desta forma uma ponte de Wheatstone. Por sua vez, cada um destes transdutores são ligados às vigas em estudo através de duas chapas metálicas (funcionando como apoios rotulados aos pilares do pórtico) presas ao betão do elemento por intermédio de pequenos varões roscados (Figura 4.54 e 4.55).

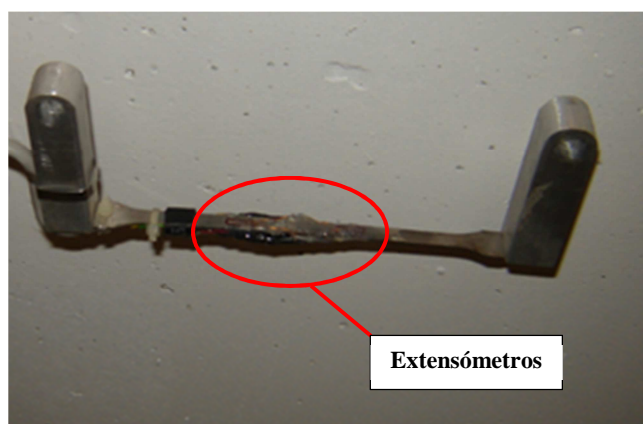


Figura 4.53: Transdutor de deslocamentos horizontais [30]

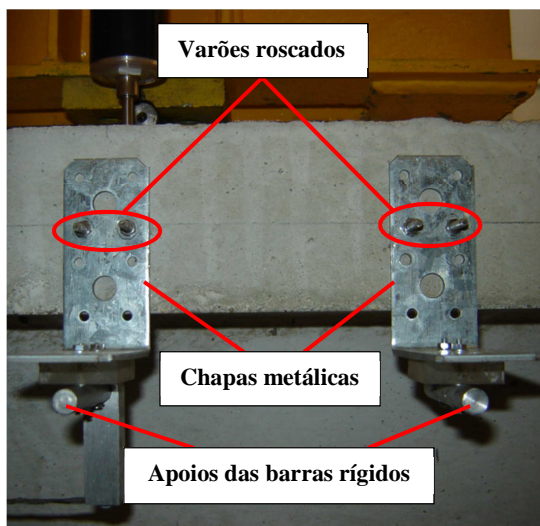


Figura 4.54: Sistema de ligação dos transdutores de deslocamentos horizontais à viga em estudo

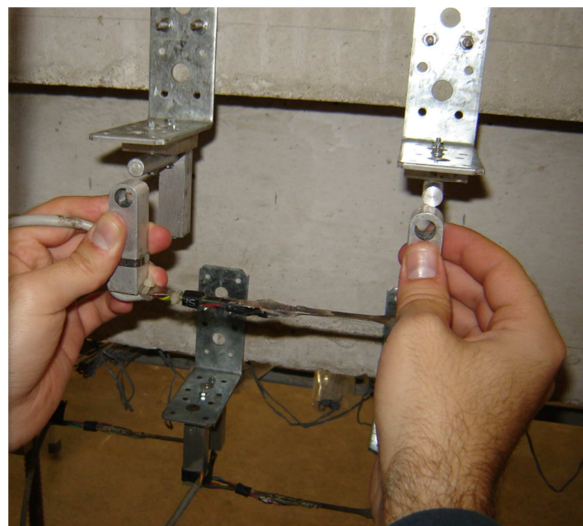


Figura 4.55: Ligação do transdutor de deslocamentos horizontais aos respectivos apoios

Os dez transdutores são alinhados horizontalmente em sequências de cinco, em diferentes alturas da viga. Como se pode verificar nas Figuras 4.55 e 4.56 cada transdutor colocado superiormente fica também alinhado verticalmente com o transdutor inferior para que desta forma seja possível obter os deslocamentos ao longo das secções transversais instrumentadas e posteriormente calcular a respectiva curvatura média.



Figura 4.56: Sistema de dez transdutores de deslocamentos horizontais

A calibração de cada transdutor foi conseguida com a ajuda de um dispositivo desenvolvido para o efeito (Figura 4.57). Este é composto por um transdutor de deslocamentos (TML CDP-100) e um sistema de manivela que obriga o transdutor que está a ser calibrado a simular o movimento característico que ocorre nos ensaios, quer este se localize na zona comprimida ou traccionada da viga.

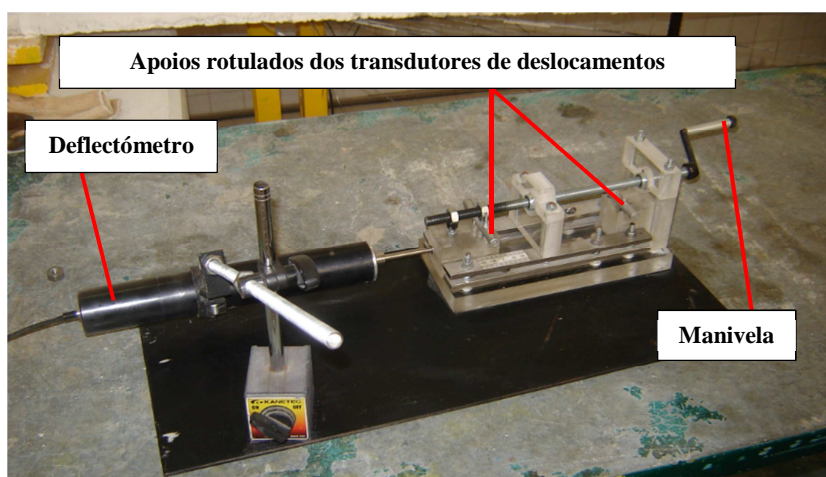


Figura 4.57: Dispositivo de calibração dos transdutores

No Apêndice A são esquematizados e numerados todos os transdutores de deslocamento utilizados para a instrumentação das vigas em estudo.

4.6.3 Células de carga

Para a quantificação das forças aplicadas durante o ensaio, foram utilizadas duas células de carga CLC-200KNA com sensibilidade de 1,5mV/V, como mostra a Figura 4.58.

Ambas as células de carga foram posicionadas por cima dos cilindros hidráulicos.

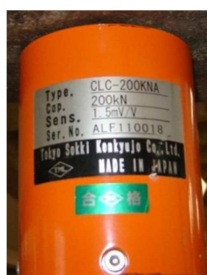


Figura 4.58: Célula de carga utilizada

4.6.4 Sistema de aquisição de dados

Toda a instrumentação descrita ao longo deste capítulo foi ligada ao *dataloger HBM Centipede 100 – UPM100* (Figura 4.59) com capacidade para 60 canais. Sempre que necessário foi também utilizado o *dataloger HBM Spider 8* (Figura 4.60).



Figura 4.59: *Dataloger HBM Centipede 100 – UPM100*

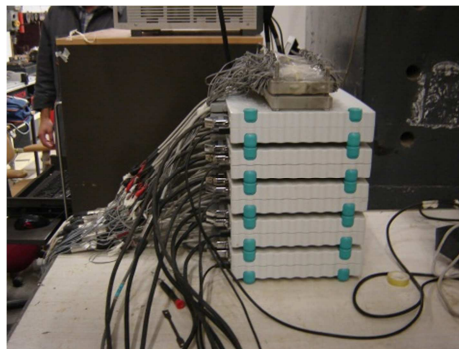


Figura 4.60: *Dataloger HBM Spider 8*

Como software de aquisição de dados foi utilizado o *Catman 4.0*, também da *HBM*.

4.7 Procedimentos de ensaio

Os modelos das vigas V6, V7, V8 e V9 e V10 foram ensaiados no laboratório de estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa nos dias 13 de Novembro de 2012, 20 de Dezembro de 2012, 28 de Fevereiro de 2013, 25 de Junho de 2013 e 19 de Julho de 2013, respectivamente.

O conjunto de trabalhos experimentais realizados compreendeu dois tipos de ensaios distintos. Com o objectivo de estudar a capacidade resistente última e o respectivo comportamento ao longo do carregamento realizaram-se ensaios monotónicos. Por outro lado, no sentido de analisar o comportamento dos elementos estudados perante ações cíclicas realizaram-se ensaios cíclicos. Nos subcapítulos seguintes serão então caracterizados separadamente os dois tipos de ensaios realizados na campanha experimental do presente trabalho.

4.7.1 Ensaios Monotónicos

Os ensaios de flexão com carregamento monotónico baseiam-se na aplicação da carga de forma continua e crescente até ser atingida a rotura da viga reforçada. Este tipo de ensaio permite analisar o comportamento e o desempenho da solução de reforço e dos materiais constituintes do elemento estrutural ensaiado.

Todas as técnicas estudadas no âmbito deste programa experimental foram ensaiadas através deste tipo de carregamento. Desta forma, os modelos das vigas V6, V8 e V9 foram levados à rotura através deste tipo de ensaio.

4.7.2 Ensaios Cíclicos

Os ensaios de flexão com carregamento cíclico baseiam-se na aplicação da carga através de ciclos sucessivos de carga e descarga. A natureza deste tipo de ensaio e a forma como a carga é aplicada obriga a que outros factores característicos do desempenho do sistema sejam testados como é o caso da resistência da ligação betão-CFRP face ao desenvolvimento de tensões nestas zonas originadas por ações cíclicas no elemento estrutural.

Com o objectivo de analisar o desempenho do sistema de reforço estudado quando sujeito a ações cíclicas, os modelos V7 e V10 foram levados à rotura através de carregamento cíclico. Ao longo dos ciclos de carga, os ramos ascendentes (carga) foram controlados por deslocamento e os ramos descendentes (descarga) por força, terminando cada ciclo de descarga aos 5 kN. O historial de carga foi idealizado com base no deslocamento de cedência (δ_{sy}) a meio-vão da viga de referência (V1) testada através de carregamento monotónico. Assim, admitiu-se que um primeiro ciclo atingisse o seu pico para valores de $1/4$ de δ_{sy} e que os picos dos restantes ciclos fossem equivalentes a $2/4$ de δ_{sy} , $3/4$ de δ_{sy} , e assim sucessivamente até $n \cdot \delta_{sy}$. Após a rotura, os ensaios consideraram-se terminados quando a viga alcançou o valor máximo de deslocamento permitido pelo respectivo sistema de ensaio. Nas Figuras 4.61 a 4.64 mostram-se os historiais de deslocamento e cargas aplicadas às vigas V7 e V10.

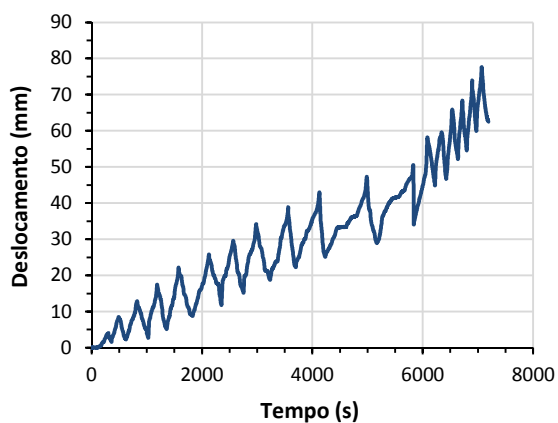


Figura 4.61: Diagrama Deslocamento vs Tempo do ensaio da viga V7

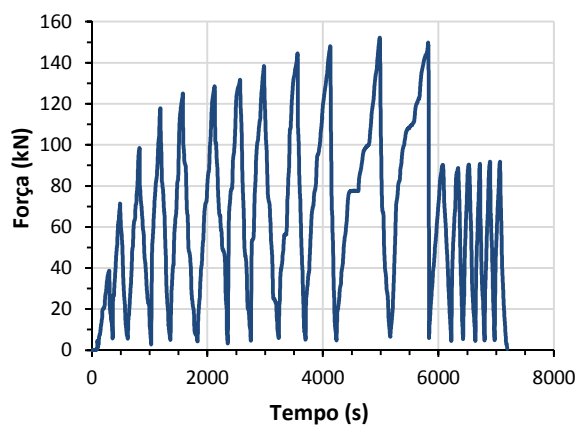


Figura 4.62: Diagrama Força vs Tempo do ensaio da viga V7

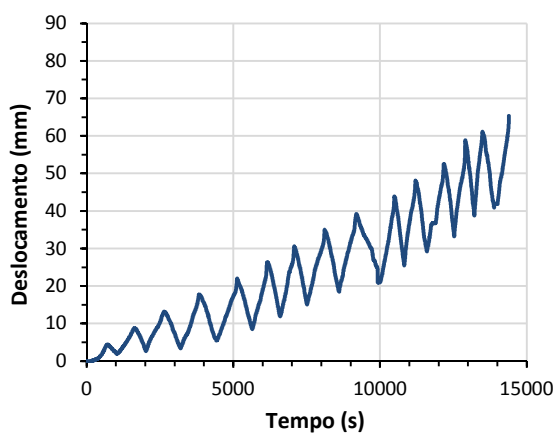


Figura 4.63: Diagrama Deslocamento vs Tempo do ensaio da viga V10

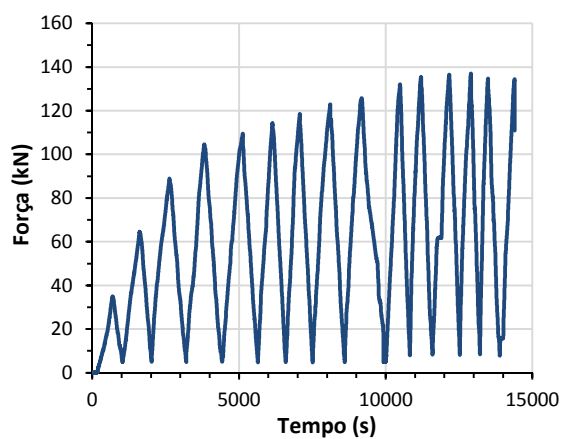


Figura 4.64: Diagrama Força vs Tempo do ensaio da viga V10

5. Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais

5.1 Considerações gerais

No âmbito do programa experimental deste trabalho, são apresentados no presente capítulo os resultados dos ensaios laboratoriais realizados com o objectivo de avaliar o desempenho das técnicas de reforço à flexão já descritas no capítulo 4. A apresentação dos resultados referidos é dividida em duas partes, sendo que a primeira se destina aos resultados obtidos nos ensaios com carregamento monotónico e a segunda aos resultados referentes aos ensaios cíclicos.

Ainda neste capítulo, com base nos diagramas apresentados, é feita a análise dos dados obtidos nos ensaios experimentais, com a qual se procuram obter conclusões importantes no que diz respeito ao desempenho das técnicas desenvolvidas. Finalmente, com o objectivo de comparar o desempenho dos sistemas EBRA e HNSMR com as técnicas EBR e NSMR já estudadas na Universidade Nova de Lisboa, todos os dados apresentados serão também comparados aos resultados obtidos na campanha de ensaios monotónicos e cíclicos realizados por Carvalho [3].

5.2 Apresentação dos resultados experimentais

5.2.1 Ensaios monotónicos

Tal como já foi referido, os modelos V6, V8 e V9 foram testados através de carregamento monotónico. Assim, é descrito a seguir o comportamento dos modelos referidos e posteriormente serão apresentados os respectivos diagramas determinados a partir dos resultados obtidos neste tipo de ensaios.

5.2.1.1 Força vs Deslocamento

Para as vigas sujeitas a um carregamento monotónico obtiveram-se os seguintes diagramas Força vs Deslocamento (Figuras 5.1 a 5.4). Estes permitirão analisar e comparar os diferentes regimes de comportamento entre os modelos que foram reforçados à flexão com as técnicas em estudo.

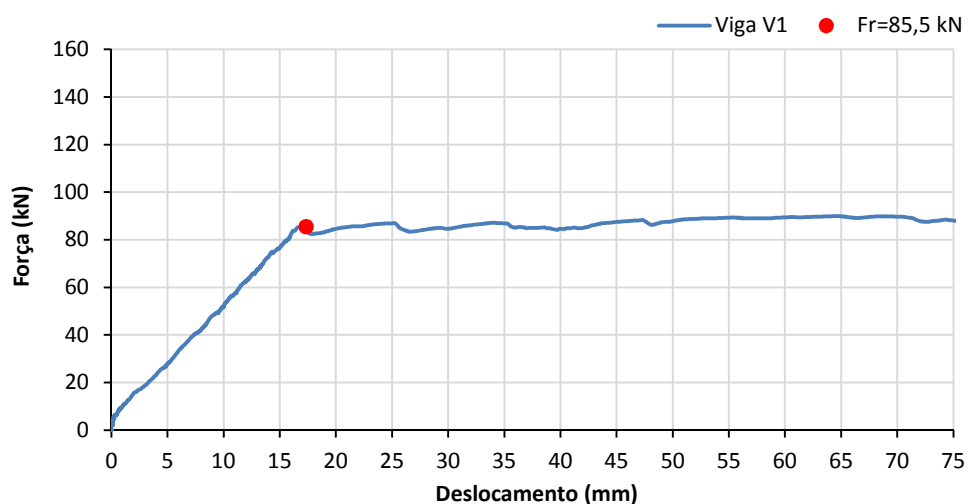


Figura 5.1: Diagrama Força vs Deslocamento do modelo da viga V1 (Referência) [3]

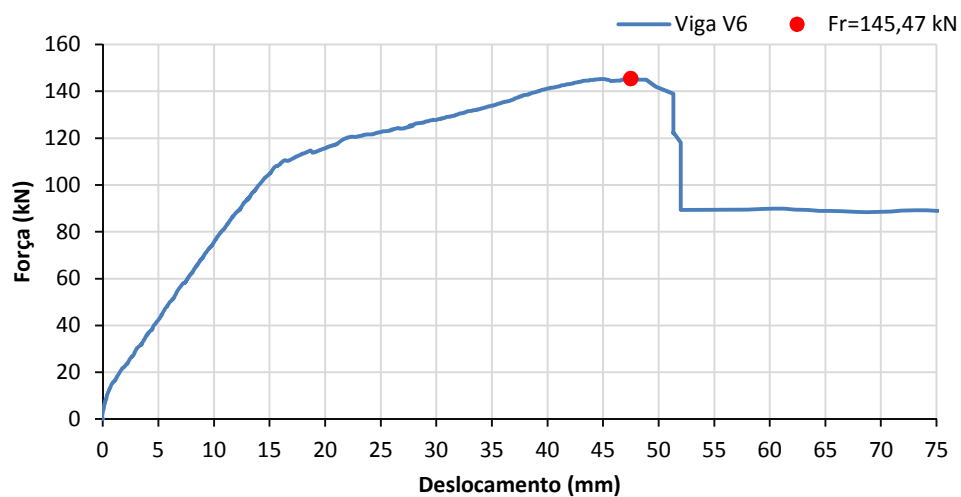


Figura 5.2: Relação Força vs Deslocamento do modelo da viga V6 (EBRA)

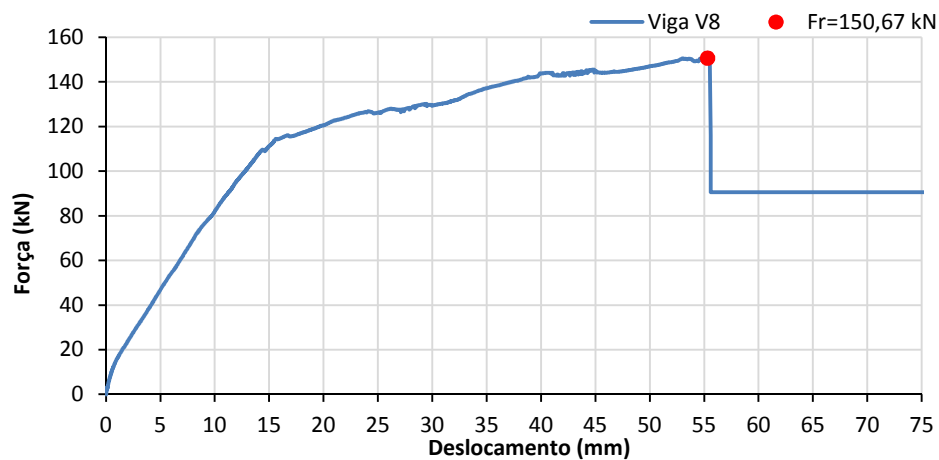


Figura 5.3: Relação Força vs Deslocamento do modelo V8 (EBRA)

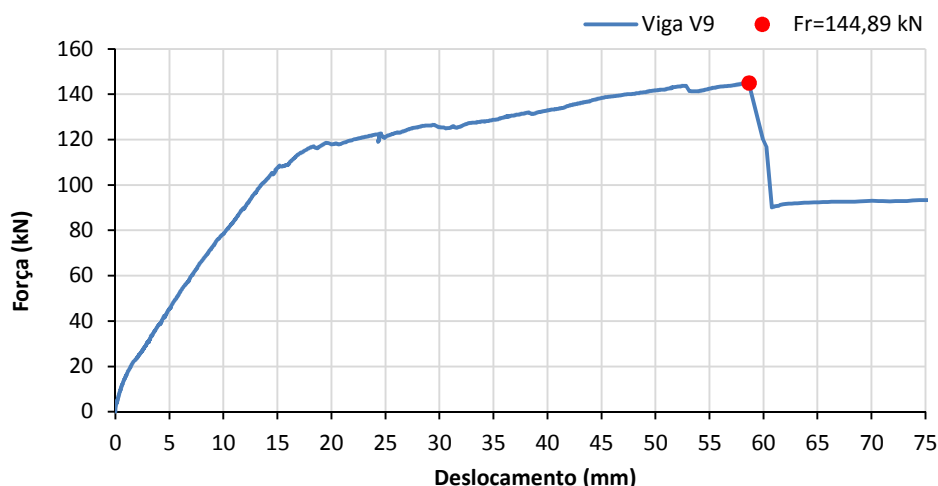


Figura 5.4: Relação Força vs Deslocamento do modelo da viga V9 (HNSMR)

Com base nos diagramas anteriormente apresentados é possível sintetizar na Tabela 5.1 os dados relativos à força e momento flector na fendilhação, na cedência das armaduras e na fase de rotura do sistema de reforço. Na Tabela 5.1 também se indicam as variações obtidas relativamente à viga V1 não reforçada.

Modelo	F_{cr} (kN)	M_{cr} (kN.m)	Δ_{Mcr} (%)	F_y (kN)	M_y (kN.m)	Δ_{My} (%)	F_r (kN)	M_r (kN.m)	$\frac{M_r - M_y}{M_y}$ (%)
V1	6,4	3,2	-	85,5	42,75	-	-	-	-
V6	9,4	4,7	+47,2	109,8	54,9	+28,4	145,5	72,7	+70,1
V8	9,1	4,6	+42,5	110,0	55,0	+28,7	150,7	75,3	+76,1
V9	9,3	4,6	+44,7	108,5	54,3	+27,0	144,9	72,5	+69,5

Tabela 5.1: Síntese dos valores obtidos de força e momento flector na cedência das armaduras e rotura para os modelos V1, V6, V8 e V9

Da análise da Tabela 5.1 e das Figuras 5.1 a 5.4 constata-se que as técnicas de reforço têm um comportamento global equivalente, apresentando um incremento, relativamente à viga não reforçada, superior a 42% na fendilhação e a 27% na cedência. O incremento de momento flector entre a cedência e a rotura das vigas V6, V8 e V9 varia entre 70% e 76%.

5.2.1.2 Deformada das vigas

Com base nos deslocamentos fornecidos pelos transdutores de deslocamentos verticais foi possível traçar os seguintes diagramas representativos da evolução da deformada das vigas ao longo do carregamento. A influência dos laminados de CFRP na deformada dos modelos em estudo tanto na fase de pré-cedência como na fase de pós-cedência são analisados posteriormente, tendo em conta as diferentes técnicas estudadas.

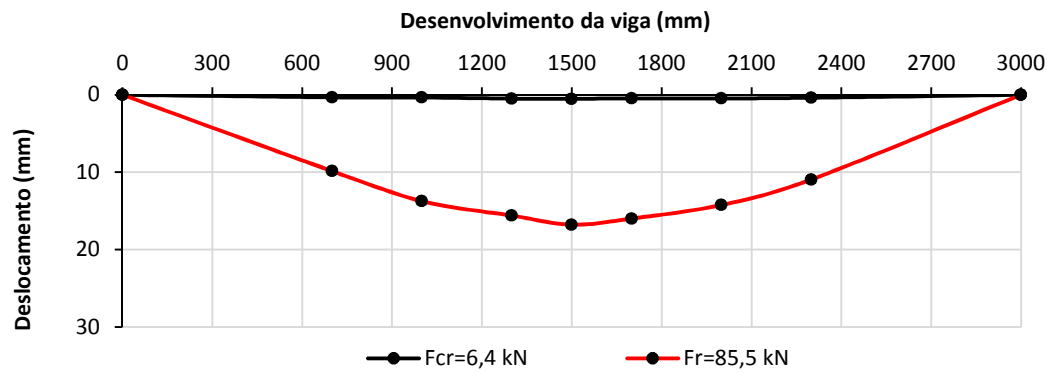


Figura 5.5: Deformada do modelo da viga V1 ao longo do carregamento (Referência) [3]

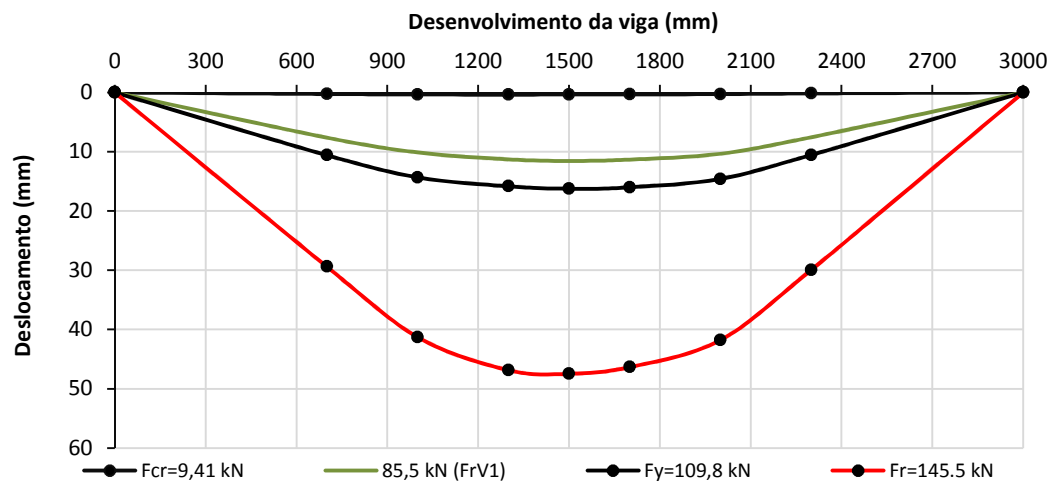


Figura 5.6: Deformada do modelo da viga V6 ao longo do carregamento (EBRA)

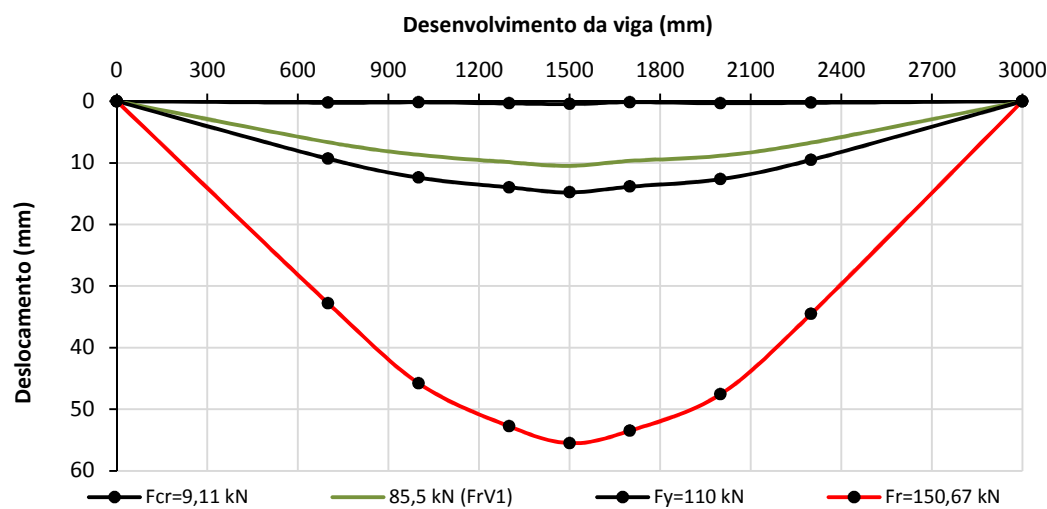


Figura 5.7: Deformada do modelo da viga V8 ao longo do carregamento (EBRA)

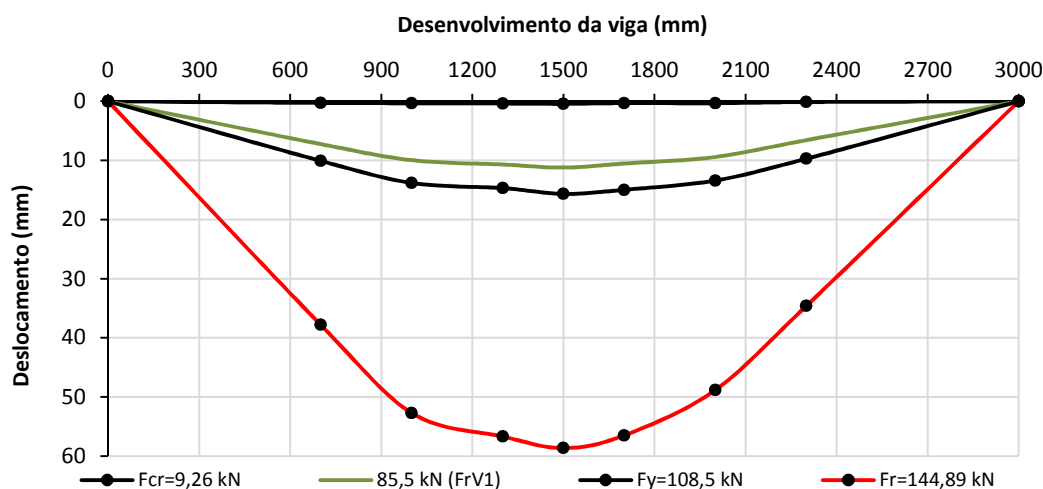


Figura 5.8: Deformada do modelo V9 ao longo do carregamento (HNSMR)

De forma resumida, são apresentados na Tabela 5.2 os deslocamentos a meio vão no instante da fendilhação, da cedência das armaduras e na rotura dos laminados de CFRP. É ainda apresentado, nas primeiras colunas desta tabela, os dados referentes ao deslocamento vertical observado em cada modelo para a carga correspondente à cedência das armaduras da viga V1 (referência). Da análise das Figuras 5.5 a 5.8 e da Tabela 5.2 constata-se que para uma carga equivalente à cedência das armaduras da viga V1, as vigas reforçadas (V6, V8 e V9) apresentam uma deformação inferior em cerca de 30%.

F (kN)	δ_{FyV1} (mm)	$\Delta\delta_{FyV1}$ (%)	δ_y (mm)	$\Delta\delta_y$ (%)	δ_r (mm)
V1	16,8	-	16,8	-	-
V6	11,6	-31,2	16,1	-3,9	47,2
V8	10,3	-38,5	14,8	-11,9	55,5
V9	11,2	-33,2	15,7	-6,8	58,7

Tabela 5.2: Sínteses dos valores obtidos de deslocamentos a meio vão na cedência das armaduras e na rotura para os modelos V1, V6, V8 e V9

5.2.1.3 Extensão nos laminados de CFRP

Com base nos valores dados pelos extensómetros colados nos laminados de CFRP, apresentam-se nas Figuras 5.9 a 5.11 o andamento das extensões ao longo do comprimento total do laminado de CFRP. Para uma melhor percepção destes valores, é apresentado um esquema para as vigas V6, V8 e V9 onde o eixo das abcissas dos gráficos referidos é adaptado à posição do laminado CFRP da viga em causa (Figuras 5.12 a 5.14). Com base nestes diagramas é possível avaliar a eficácia das técnicas estudadas, bem como o grau de utilização do respectivo material de reforço utilizado nas mesmas.

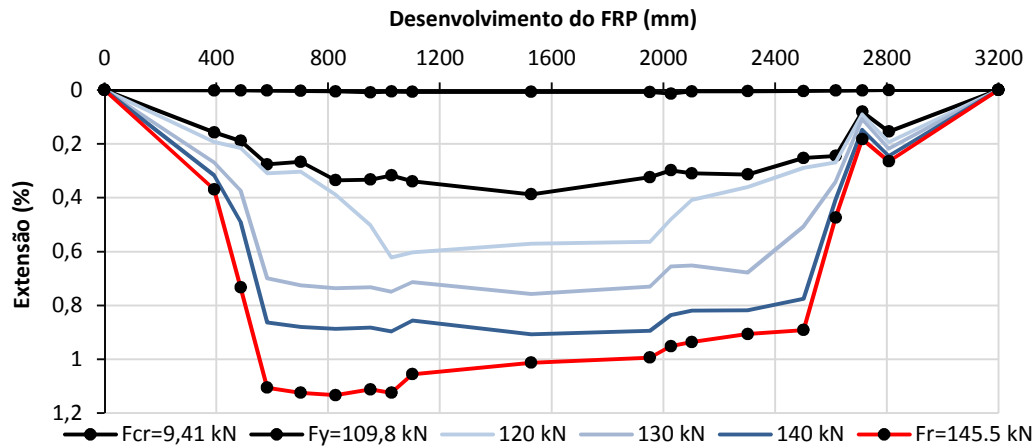


Figura 5.9: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo da viga V6 ao longo do carregamento (EBRA)

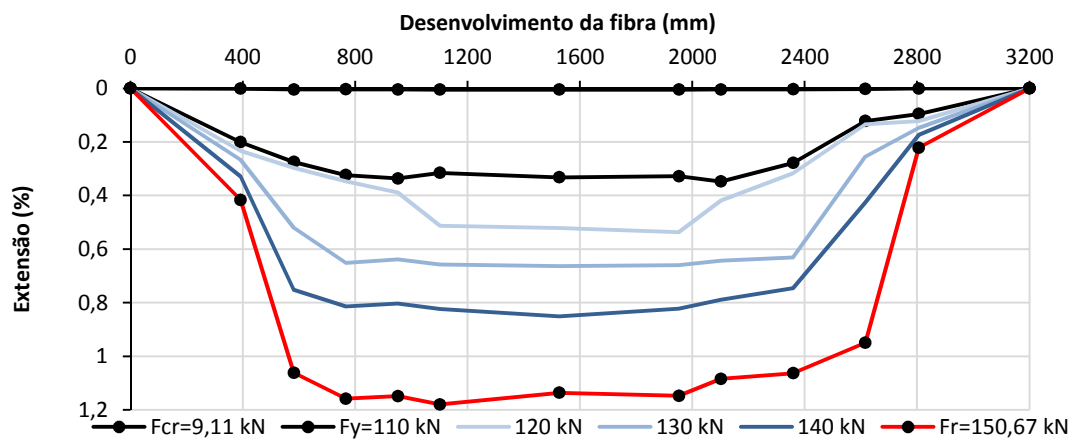


Figura 5.10: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo da viga V8 ao longo do carregamento (EBRA)

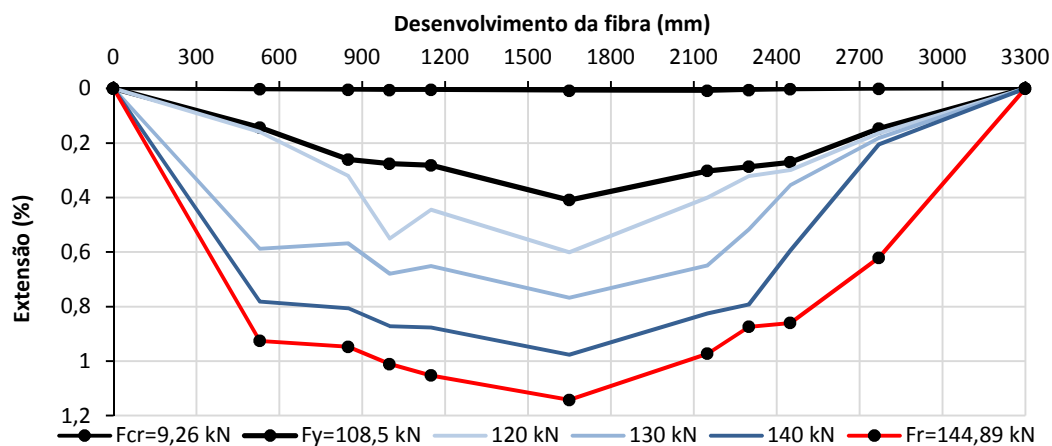


Figura 5.11: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo da viga V9 ao longo do carregamento (HNSMR)

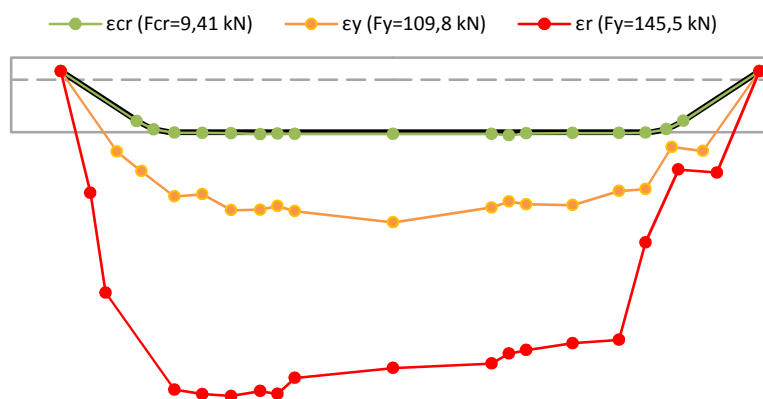


Figura 5.12: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo da viga V6 no instante da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do sistema

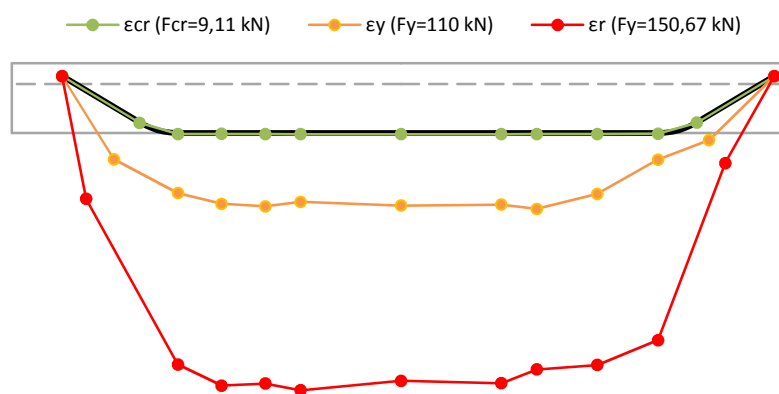


Figura 5.13: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo da viga V8 no instante da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do sistema

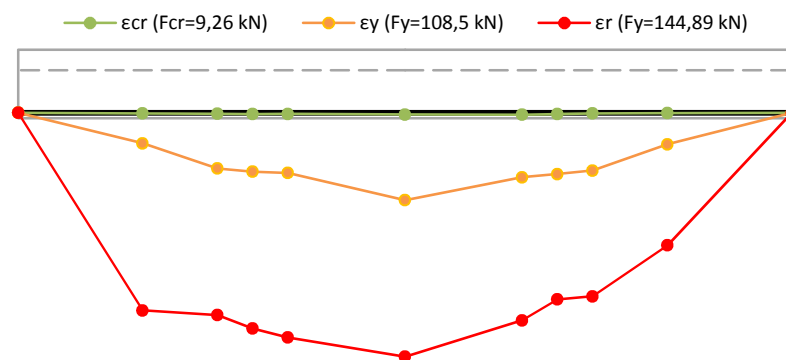


Figura 5.14: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo V9 no instante da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do sistema

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores de extensão máxima obtidos nos instantes da cedência das armaduras ($\varepsilon_{f,y}$) e rotura do sistema de reforço ($\varepsilon_{f,r}$). De acordo com o valor médio de extensão última ($\varepsilon_{f,u}$) determinado previamente para os laminados de CFRP utilizados, é ainda apresentado o grau de utilização destes conseguido em cada viga (V6, V8 e V9) através de um coeficiente $\beta_u(\%)$ que é obtido pela Eq.5.1.

$$\beta_u = \frac{\varepsilon_{f,máx,r}}{\varepsilon_{f,u}} \times 100 \quad (5.1)$$

Modelo	$\varepsilon_{f,máx,y} (\%)$	$\varepsilon_{f,máx,r} (\%)$	$\varepsilon_{f,u} (\%)$	$\beta_u (\%)$
	Extensómetro	Extensómetro		
V6	0,39	1,13	1,03	>100
	E29	E25		
V8	0,35	1,18		>100
	E32	E28		
V9	0,41	1,14		>100
	E8	E8		

Tabela 5.3: Síntese dos principais valores de extensão no CFRP dos modelos das vigas V6, V8 e V9

Com base no momento flector ao longo de cada ensaio e do respectivo valor de extensão obtido no laminado de CFRP, a meio vão das vigas em estudo, foi possível obter as Figuras 5.15 a 5.17. Com estes diagramas, é possível compreender o nível de deformação do material de reforço, em cada técnica utilizada, à medida que o momento flector varia com o decorrer do ensaio do respectivo modelo.

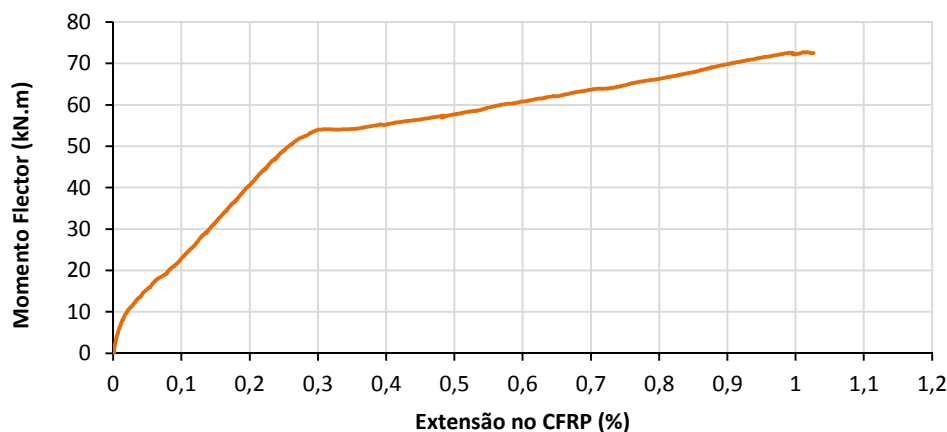


Figura 5.15: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V6 (EBRA)

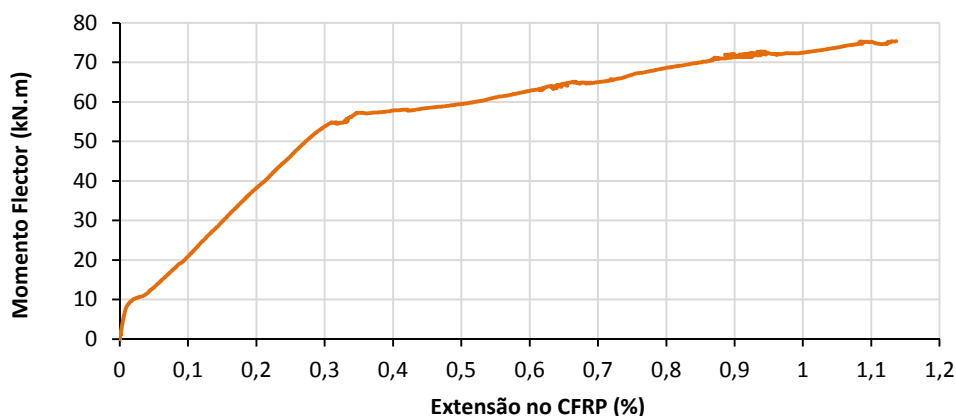


Figura 5.16: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V8 (EBRA)

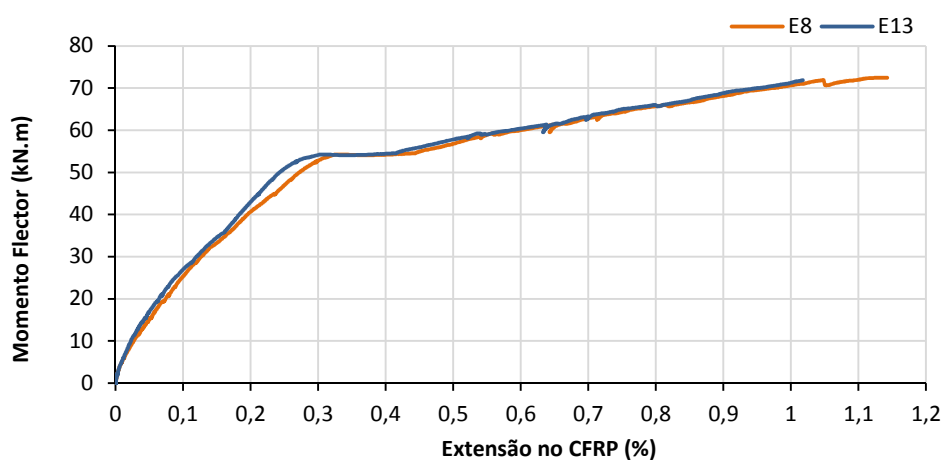


Figura 5.17: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V9 (HNSMR)

5.2.1.4 Curvatura nas vigas

Tendo em conta os valores fornecidos pelos transdutores de deslocamentos horizontais, é de seguida representado para cada viga ensaiada com carregamento monotónico o respectivo diagrama de curvaturas em diferentes secções da viga. Devido ao facto dos referidos transdutores se terem instalado apenas ao longo de metade do comprimento de cada viga, os diagramas que se representam de seguida dizem respeito apenas aos valores medidos desde o meio vão até ao apoio fixo da viga em estudo.

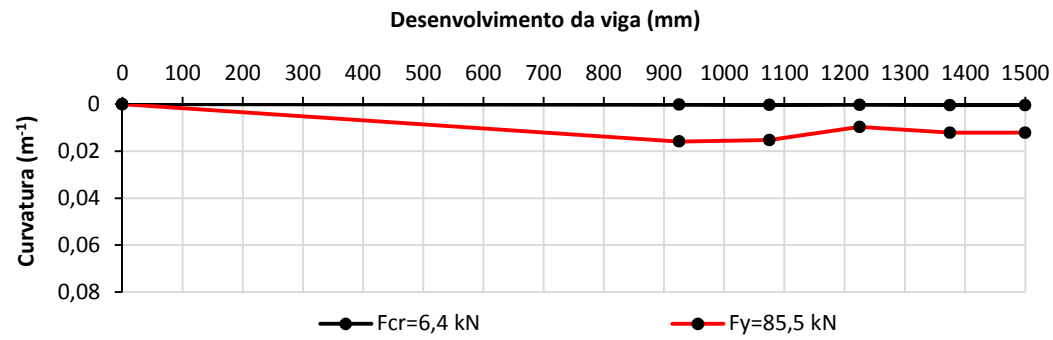


Figura 5.18: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação e cedência das armaduras do modelo V1 [3]

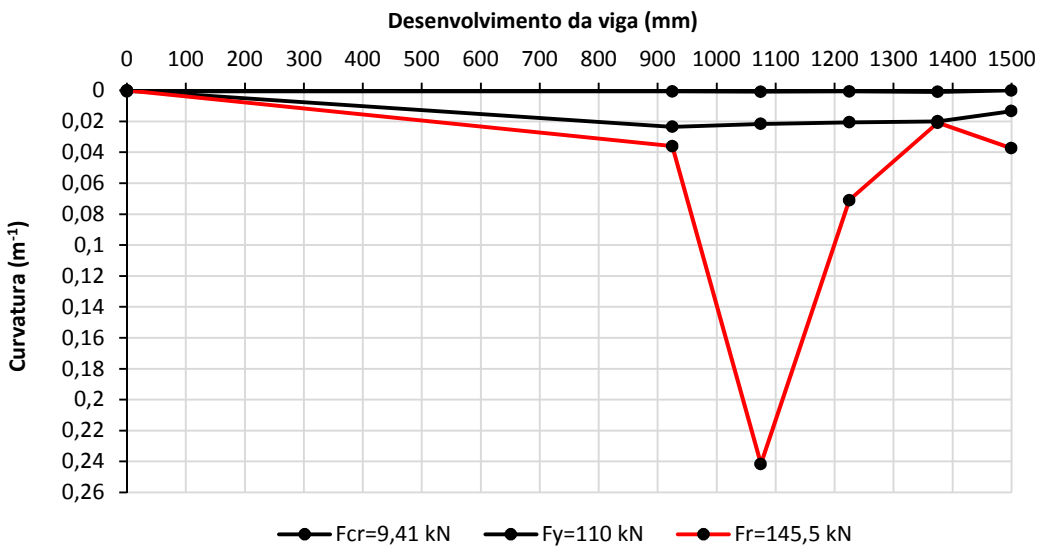


Figura 5.19: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação, cedência e rotura do modelo V6

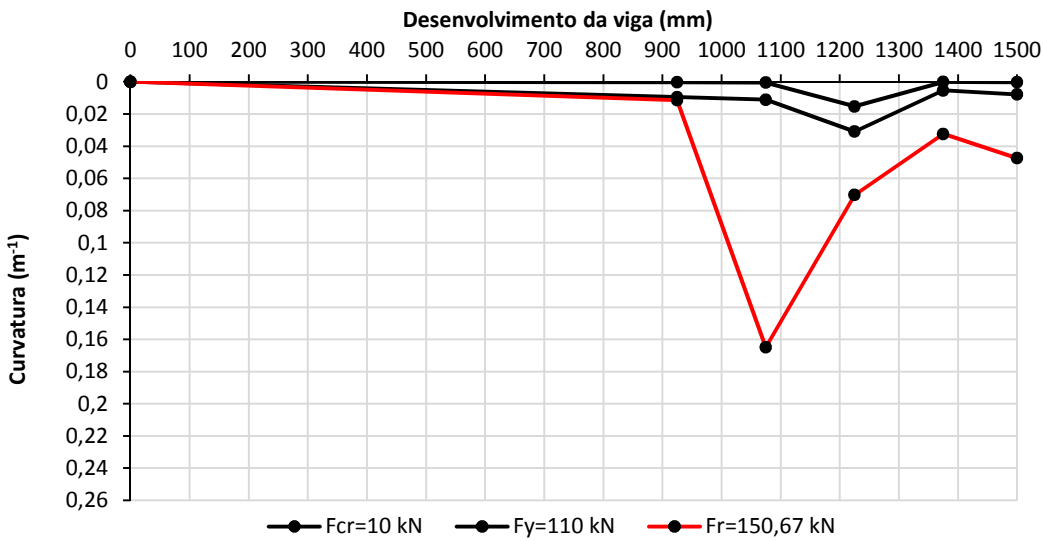


Figura 5.20: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação, cedência e rotura do modelo V8

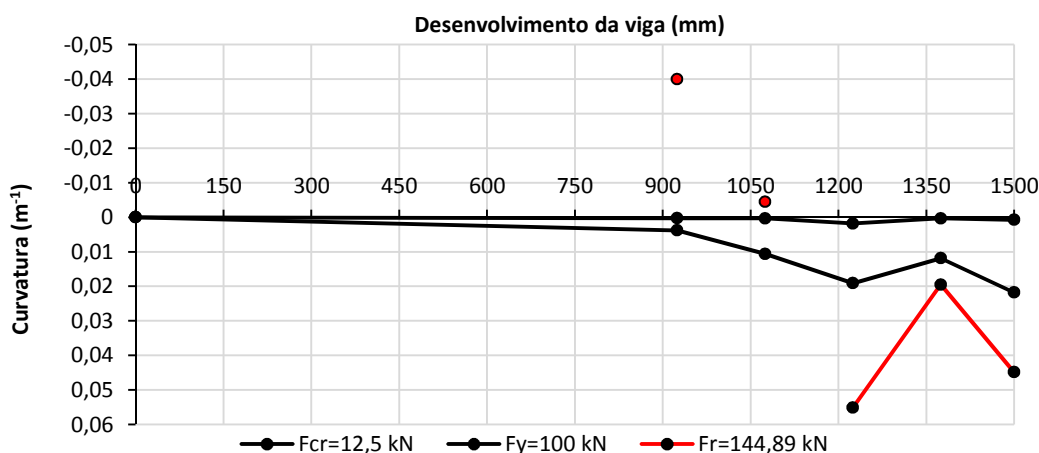


Figura 5.21: Curvaturas observadas nos instantes da fendilhação, cedência e rotura do modelo V9

Refira-se que a determinado instante do ensaio da viga V9 verificou-se que, quer o transdutor de deslocamentos horizontal superior quer o inferior começaram a registar valores negativos. Isto significa que, segundo os referidos dados, estas secções transversais estariam totalmente em compressão. Sendo este um fenómeno difícil de acontecer numa viga bi-apoiada e com o tipo de carregamento a que esta foi submetida, optou-se por não representar a parte do diagrama composto pelos pontos (a vermelho na Figura 5.21) de valor supostamente incorreto.

5.2.1.5 Modos de rotura

Para além da apresentação dos resultados obtidos é também importante proceder à descrição dos modos de rotura obtidos nas vigas ensaiadas. Nas Figuras 5.22 a 5.24 é apresentado o aspecto geral das vigas V6, V8 e V9 após os ensaios monotónicos.

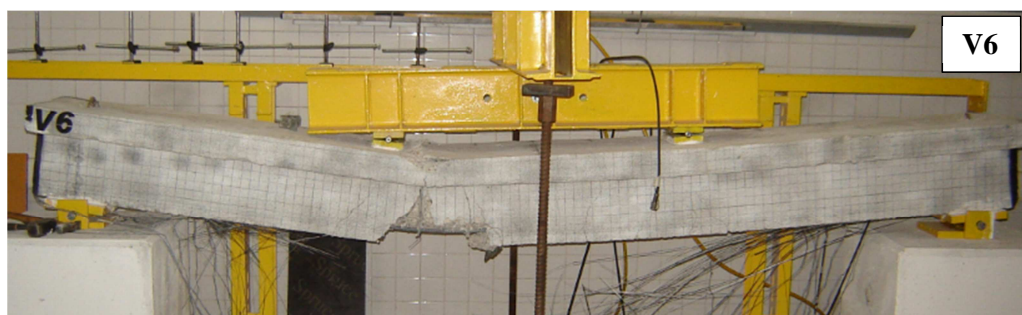


Figura 5.22: Aspecto global da viga V6 (EBRA) após o ensaio monotónico



Figura 5.23: Aspecto global da viga V8 (EBRA) após o ensaio monotónico

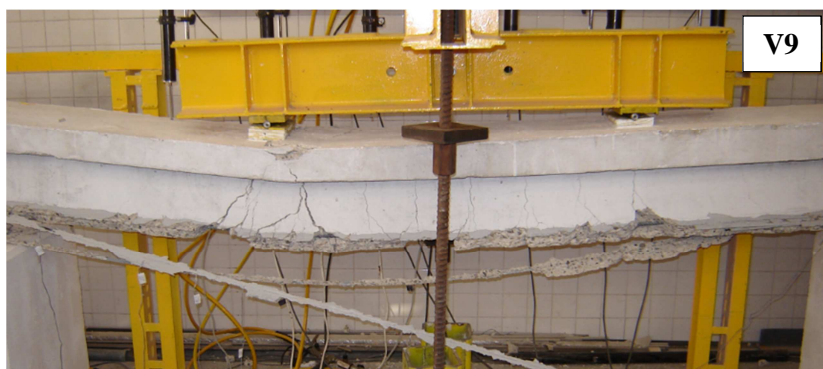


Figura 5.24: Aspecto global da viga V9 (HNSMR) após o ensaio monotónico

No que diz respeito aos modelos reforçados com a técnica EBRA e testados monotonicamente (V6 e V8), constatou-se que durante os instantes iniciais do carregamento se desenvolveram fissuras de flexão e de esforço transversal de reduzida abertura ao longo do comprimento da viga (Figura 5.25). Com o aumento do carregamento observou-se um desenvolvimento com maior intensidade das fissuras localizadas a meio vão das vigas e nos locais sob os pontos de aplicação das cargas (Figura 5.26). No decorrer do ensaio apenas em zonas intermédias da viga, onde o CFRP foi colado exteriormente na face inferior da alma, foi observado o descolamento do laminado (Figura 5.27). Por outro lado, no interior dos furos não se registou qualquer tipo de problema com origem na aderência CFRP-betão, o que evitou o surgimento de roturas prematuras, possibilitando a utilização total da resistência à tração do material compósito. Refira-se ainda que antes da rotura surgiram fenómenos de esmagamento do betão na face superior do banzo, junto ao ponto de aplicação das cargas na viga (Figura 5.28). Tal como esperado, a rotura dos laminados deu-se de forma sequencial, laminado a laminado, nos locais de formação das rótulas plásticas ou próximo destas sem qualquer tipo de destacamento do betão (Figura 5.29). Desta forma, constatou-se que foi possível mobilizar toda a resistência dos laminados de CFRP com esta técnica de reforço.

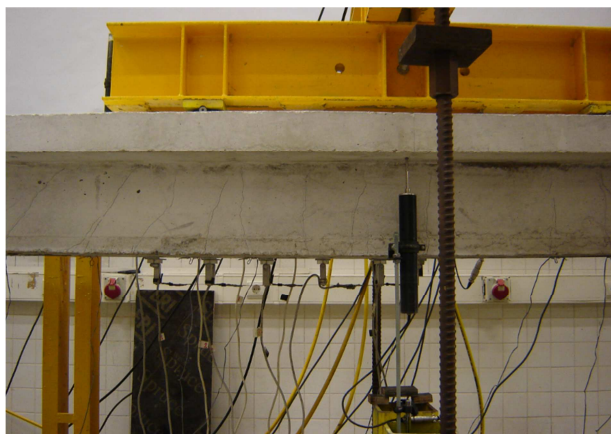


Figura 5.25: Fendilhação ao longo do comprimento da viga V8

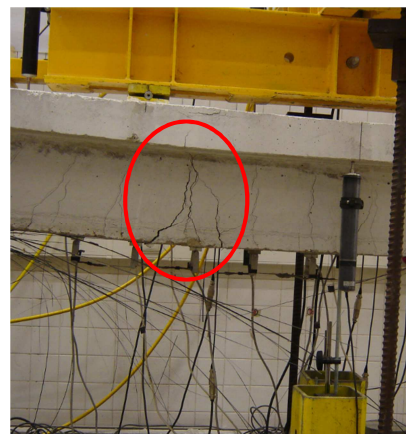


Figura 5.26: Fendilhação mais acentuada nas zonas de formação de rótulas plásticas na viga V8

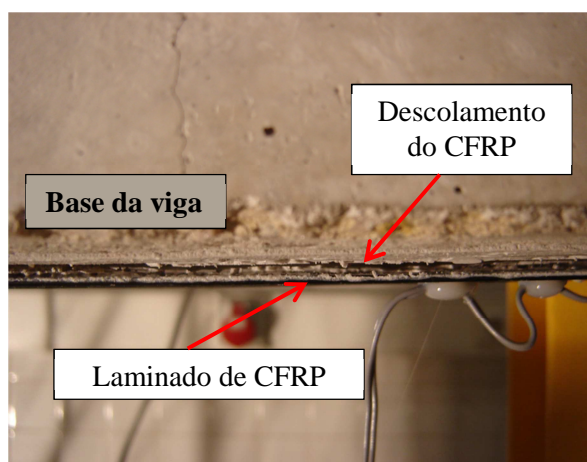


Figura 5.27: Descolamento do CFRP em zonas intermédias da viga observado nos modelos V6 e V8



Figura 5.28: Esmagamento do betão na face superior do banzo da viga nos modelos V6 e V8

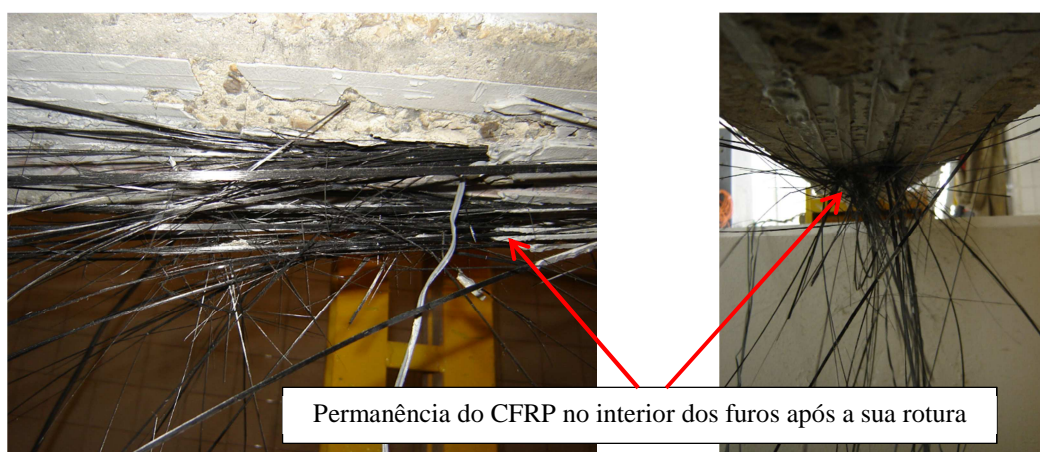


Figura 5.29: Pormenores da pós-rotura do laminado de CFRP dos modelos V6 e V8

Quanto ao modelo reforçado com a técnica HNSMR e testado com carregamento monotónico (V8), o modo de rotura revelou-se diferente do observado na técnica EBRA. Apesar das fissuras surgidas logo nos instantes iniciais do ensaio (Figura 5.30) se terem desenvolvido também com maior intensidade a meio vão e na zona de formação das rótulas plásticas, foi possível verificar numa fase mais avançada do ensaio o aparecimento de uma fenda longitudinal ao nível dos rasgos laterais. Após o seu surgimento, com origem numa das fissuras principais situadas na zona das rótulas plásticas, esta fenda desenvolveu-se rapidamente em direção ao apoio mais próximo (Figura 5.31), enquanto no interior, outra fenda com 45° relativamente à horizontal surgia com origem no laminado de CFRP (Figura 5.33). Já com o esmagamento do betão detectado ao nível da face superior do banzo da viga, ocorreu o escorregamento de um dos laminados de CFRP (Figura 5.32), e de seguida a cunha de betão formada através das fendas anteriormente descritas foi destacada (Figura 5.34). Refira-se que apesar da ocorrência indesejada de roturas prematuras, a extensão de tração do CFRP aquando do escorregamento foi superior à extensão última estimada previamente (1,03 %).

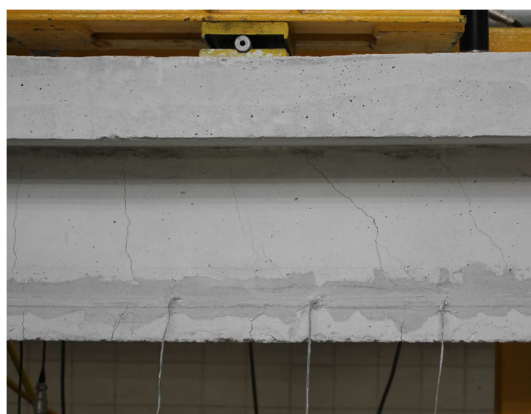


Figura 5.30: Pormenor da fendilhação do betão nos instantes iniciais do ensaio da viga V9



Figura 5.31: Pormenor da fenda longitudinal ao nível do rasgo na alma da viga V9



Figura 5.32: Escorregamento do CFRP na viga V9

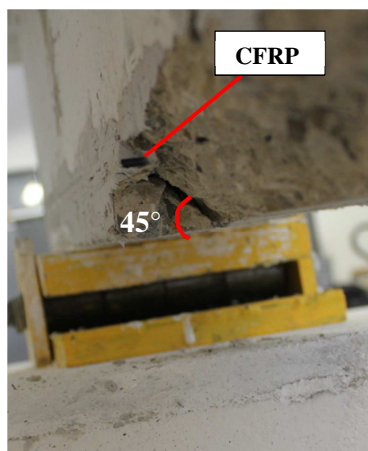


Figura 5.33: Pormenor da cunha de betão na viga V9



Figura 5.34: Destacamento do betão na viga V9

5.2.2 Ensaios cíclicos

Apresentam-se em seguida os resultados referentes aos ensaios cíclicos.

5.2.2.1 Força vs Deslocamento

Nas Figuras 5.35 e 5.36 indicam-se os diagramas Força vs Deslocamento das vigas V7 reforçadas com a técnica EBRA e da viga V10 reforçada com a técnica HNSMR e ensaiadas com cargas cíclicas.

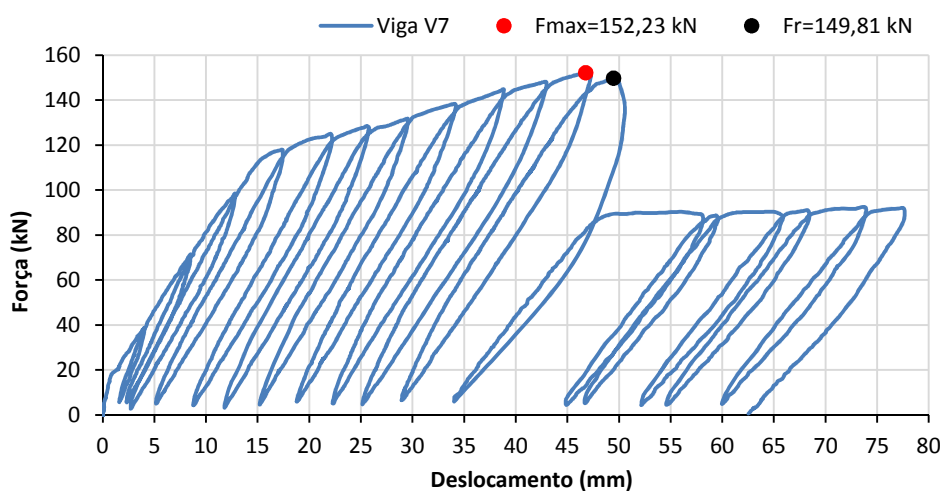


Figura 5.35: Diagrama Força vs Deslocamento do modelo da viga V7 (EBRA)

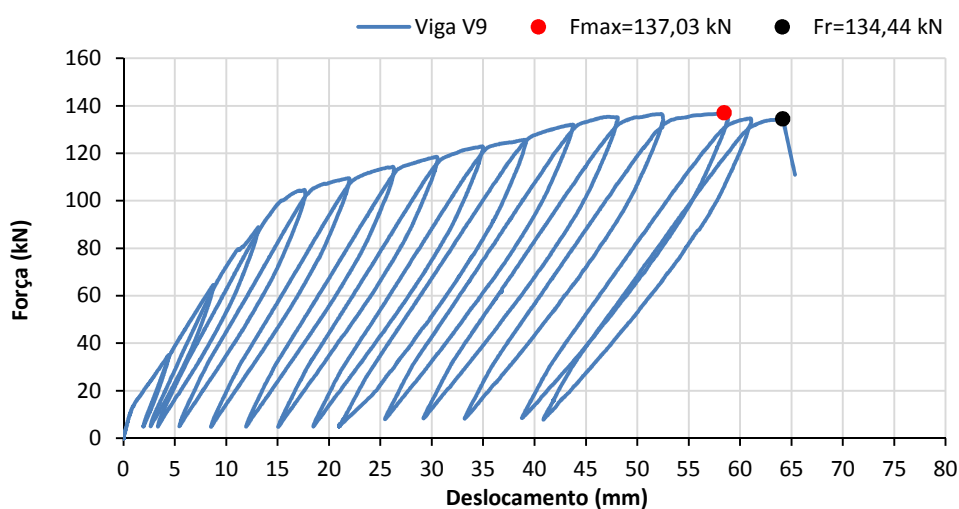


Figura 5.36: Diagrama Força vs Deslocamento do modelo da viga V10 (HNSMR)

Na Tabela 5.4 sintetizam-se os resultados relativos à força e momento flector no instante da fendilhação, da cedência das armaduras e na fase de rotura dos laminados de CFRP.

Modelo	F_{cr} (kN)	M_{cr} (kN.m)	F_y (kN)	M_y (kN.m)	F_{max} (kN)	M_{max} (kN.m)	F_r (kN)	M_r (kN.m)
V7	16,2	8,1	113,71	56,86	152,23	76,12	149,81	74,91
V10	9,59	4,8	100,04	50,02	137,03	68,52	134,44	67,22

Tabela 5.4: Síntese dos valores obtidos de força e momento flector na fendilhação, cedência das armaduras e rotura para os modelos das vigas V7 e V10

5.2.2.2 Deformada da viga

Seguindo a mesma disposição considerada para os ensaios monotónicos são agora apresentados os dados referentes às deformadas das vigas V7 e V10. Refira-se que os resultados legendados e tabelados dizem respeito aos deslocamentos por patamar de força no instante em que o valor de força em questão é atingido pela primeira vez no ensaio.

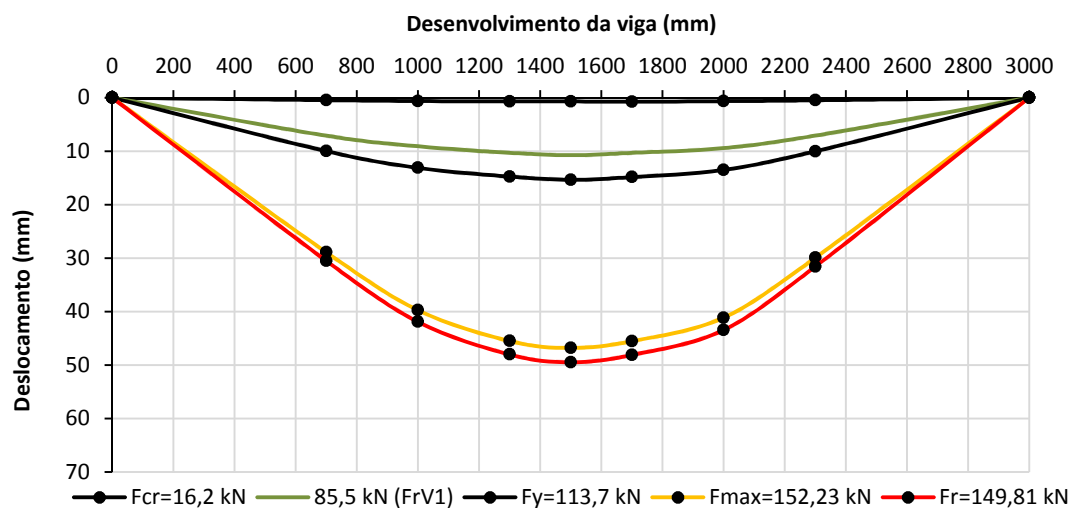


Figura 5.37: Deformada do modelo V7 ao longo do carregamento (EBRA)

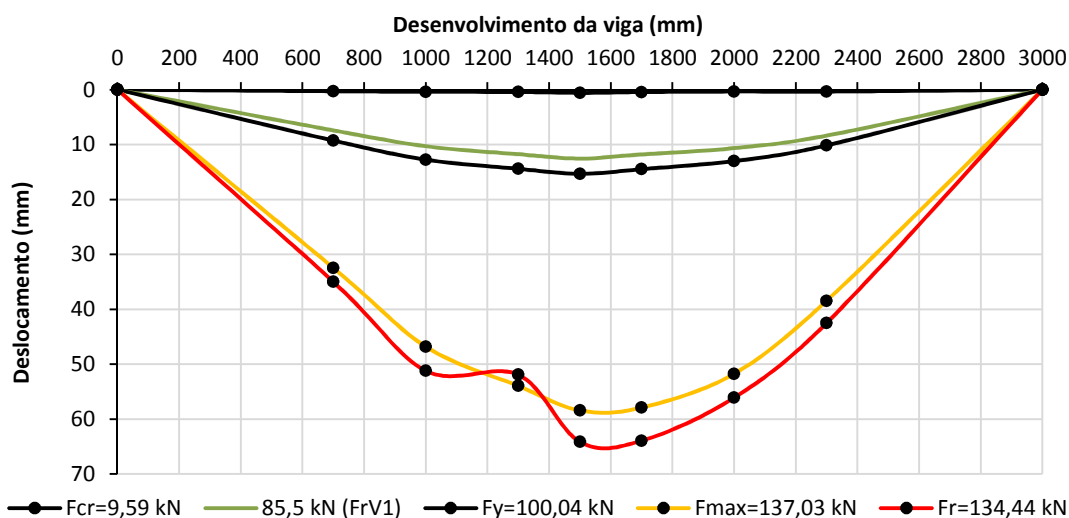


Figura 5.38: Deformada do modelo V10 ao longo do carregamento (HNSMR)

Na Tabela 5.5, indicam-se os deslocamentos a meio vão tanto no momento da cedência das armaduras como no instante da rotura dos laminados de CFRP dos modelos testados ciclicamente. É ainda apresentado nesta tabela, o deslocamento vertical observado nestes modelos para a carga correspondente à cedência das armaduras da viga V1 (85,5 kN) e o deslocamento vertical observado no instante em que a carga máxima foi atingida.

F (kN)	$\delta_{85,5kN}$ (mm)	δ_y (mm)	$\delta_{F_{max}}$ (mm)	δ_r (mm)
V7	10,74	15,34	46,77	49,46
V10	12,55	15,33	58,44	64,16

Tabela 5.5: Síntese dos deslocamentos a meio vão na cedência das armaduras e na rotura para os modelos V7 e V10

Da análise dos resultados das Figuras 5.37 e 5.38 e da Tabela 5.5 constata-se que a viga V10 (HNSMR) apresenta em geral maior deformabilidade que a viga V7 (EBRA).

5.2.2.3 Extensão nos laminados de CFRP

Apresenta-se em seguida, os resultados que permitem analisar o grau de deformação do laminado de CFRP ao longo do carregamento cíclico aplicado no modelo da viga V7. Neste caso é também importante ter em consideração que todos os valores de extensão correspondentes a uma determinada força aplicada dizem respeito às extensões para as quais o valor da referida força foi atingido pela primeira vez durante o ensaio cíclico.

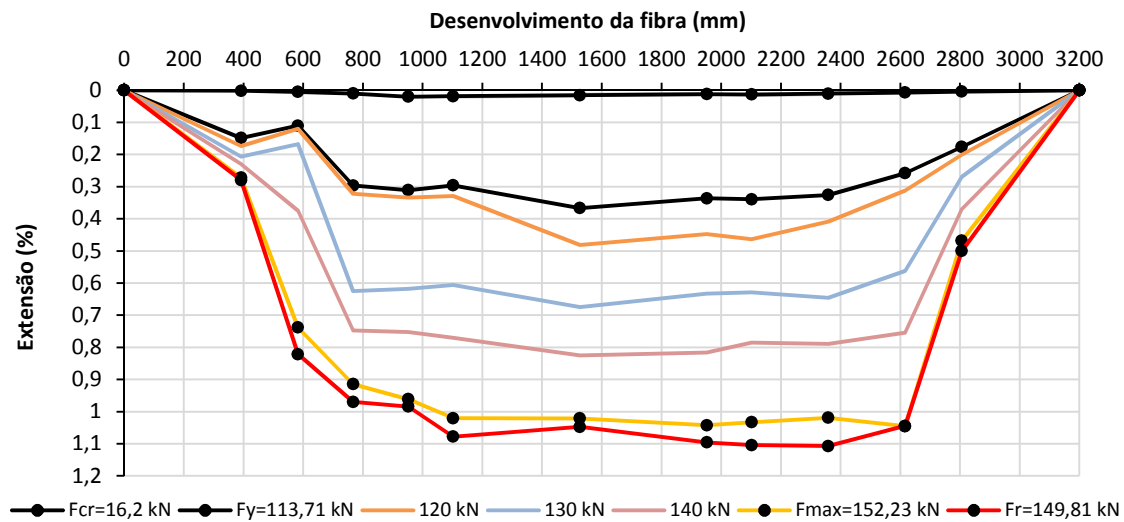


Figura 5.39: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo V7 ao longo do carregamento (EBRA)

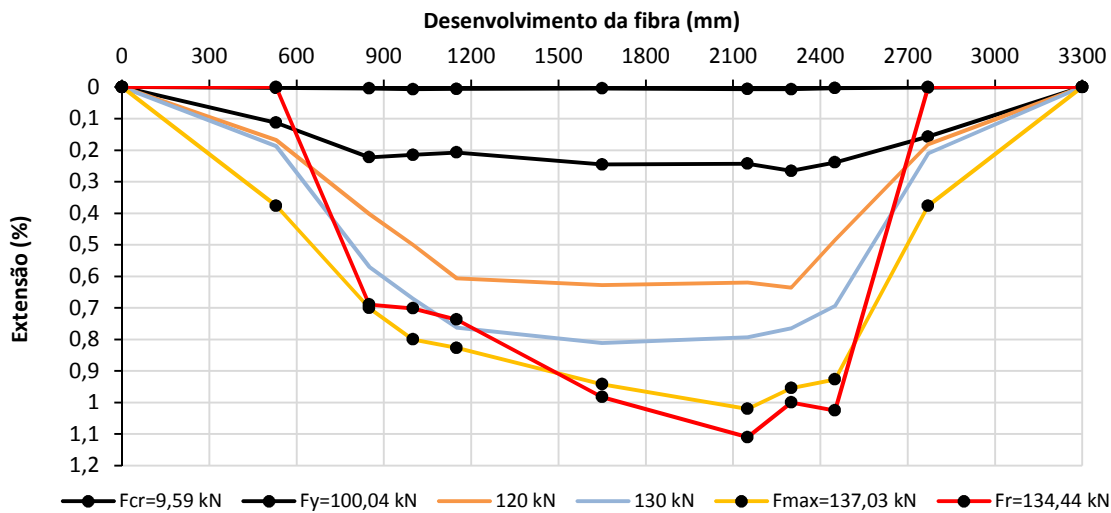


Figura 5.40: Extensão longitudinal do laminado de CFRP do modelo V10 ao longo do carregamento (HNSMR)

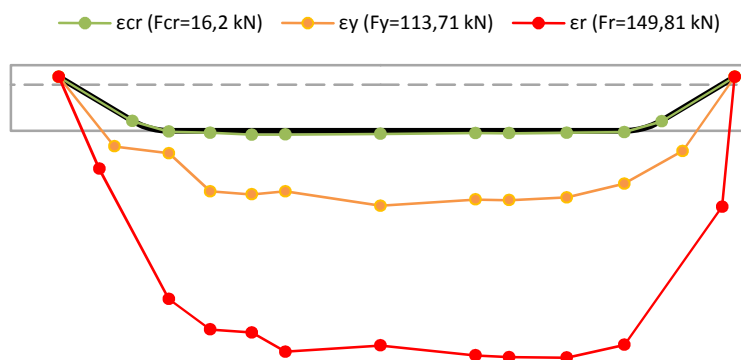


Figura 5.41: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo V7 no instante da cedência das armaduras e rotura do sistema

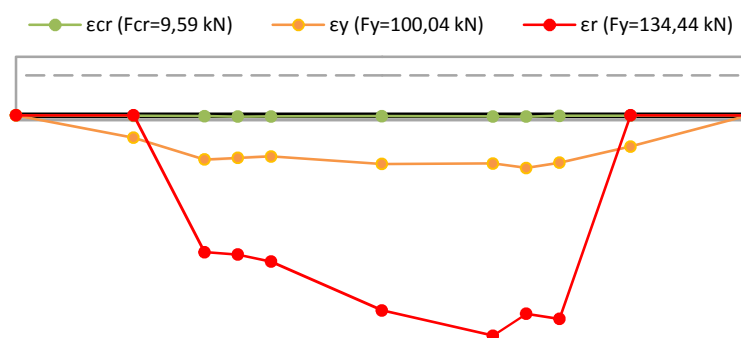


Figura 5.42: Esquema das extensões no laminado de CFRP do modelo V10 no instante da cedência das armaduras e rotura do sistema

Na Tabela 5.6 apresentam-se os valores máximos de extensão nos instantes da cedência das armaduras ($\epsilon_{f,y}$) e rotura do sistema de reforço ($\epsilon_{f,r}$). Da mesma forma que nos modelos das vigas ensaiadas através de carregamento monotónico, é apresentado também o coeficiente $\beta_u(\%)$ que representa o grau de utilização obtido nos laminados de CFRP utilizados.

Modelo	$\epsilon_{f,y}(\%)$	$\epsilon_{f,r}(\%)$	$\epsilon_{f,u}(\%)$	$\beta_u(\%)$
	Extensómetro	Extensómetro		
V7	0,366	1,11	1,03	>100
	29	33a		
V10	0,266	1,11		>100
	10	9		

Tabela 5.6: Síntese dos principais valores obtidos de extensão no CFRP dos modelos V7 e V10

À semelhança dos resultados dos ensaios monotónicos, apresentam-se de seguida os diagramas referentes à relação momento flector vs extensão no CFRP dos modelos das vigas ensaiadas com carregamento cíclico.

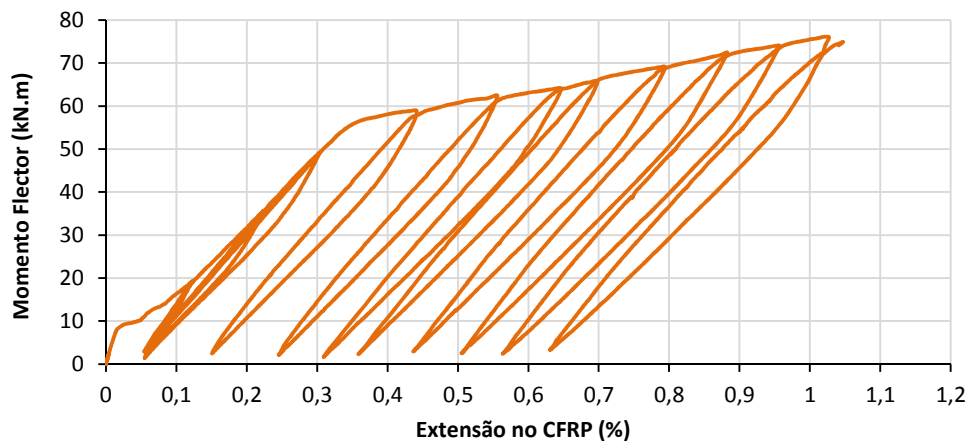


Figura 5.43: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V7 (EBRA)

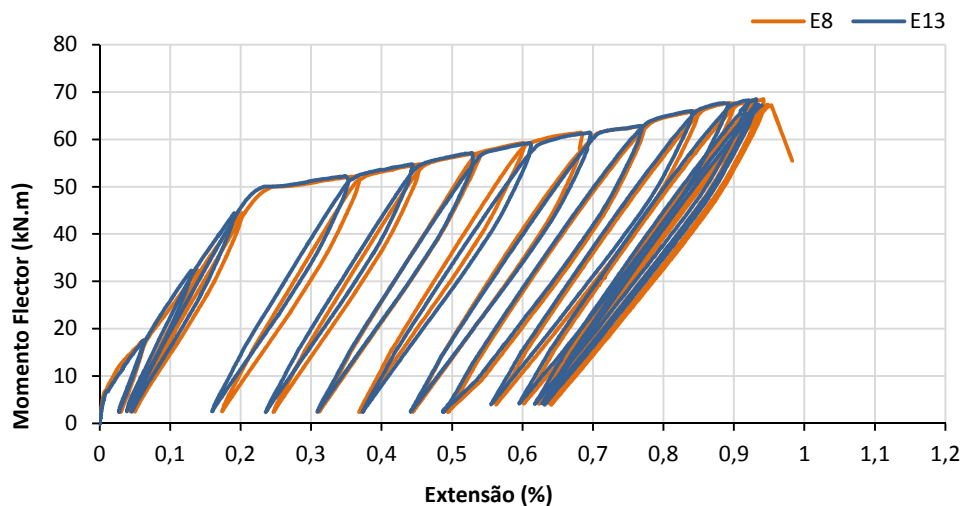


Figura 5.44: Relação momento flector vs extensão no CFRP (meio vão) do modelo da viga V10 (HNSMR)

5.2.2.4 Curvatura na viga

Utilizando a mesma organização e nomenclatura considerada na apresentação dos resultados dos modelos ensaiados com carregamento monotónico, são de seguida representados os diagramas referentes às curvaturas ao longo de metade do comprimento de cada viga testada ciclicamente.

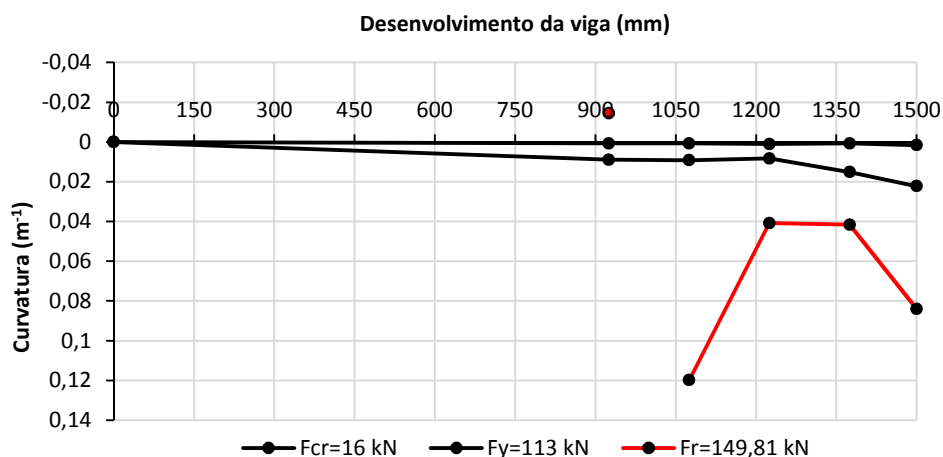


Figura 5.45: Curvaturas observadas no instante da fendilhação, cedência e rotura do modelo V7 (EBRA)

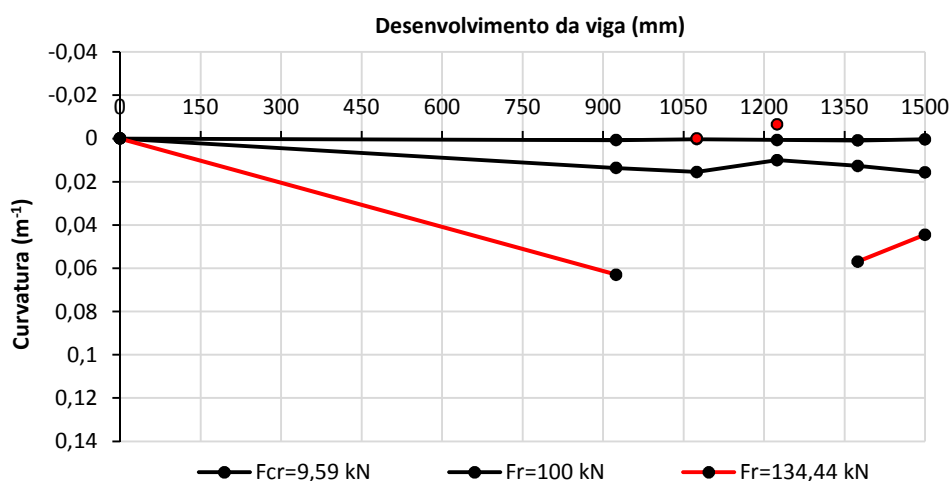


Figura 5.46: Curvaturas observadas no instante da fendilhação, cedência e rotura do modelo V10 (HNSMR)

Tanto na viga V7 como na viga V10, foi observado o fenómeno que surgiu no decorrer do ensaio da viga V9. Igualmente nestas vigas, tanto o transdutor de deslocamentos horizontais superior como o inferior de certas zonas analisadas, começaram a registar valores negativos indicando assim a existência de compressão em toda a secção transversal. Tal como se procedeu para o diagrama das curvaturas da viga V9 (Figura 5.21), optou-se por não se representar nas Figuras 5.45 e 5.46, as partes do diagrama compostas pelos pontos em causa (a vermelho).

5.2.2.5 Modos de rotura

As Figuras 5.47 e 5.48 mostram o aspecto global das vigas V7 e V10, respectivamente, após a ocorrência da rotura dos sistemas de reforço nos ensaios cíclicos.



Figura 5.47: Aspecto global da viga V7 (EBRA) após o ensaio cíclico

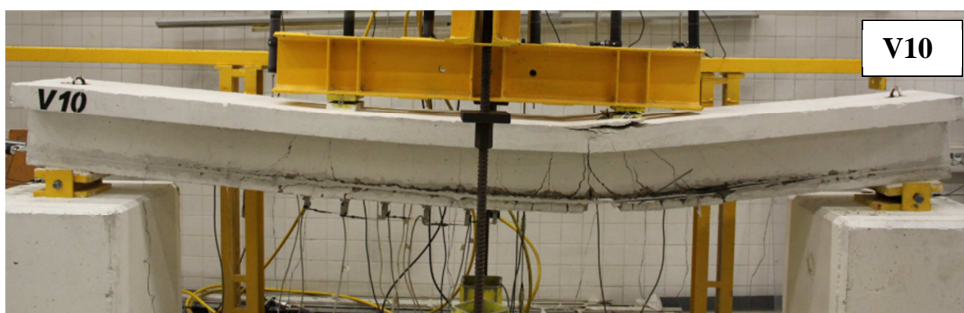


Figura 5.48: Aspecto global da viga V10 (HNSMR) após o ensaio cíclico

No ensaio do modelo da viga reforçada com a técnica EBRA (V7), não se verificaram alterações significativas no modo de rotura em relação aos ensaios monotónicos. Ou seja, a rotura da viga V7 ocorreu pelos laminados de CFRP, próximo das zonas da viga onde se formaram rótulas plásticas.



Figura 5.49: Permanência do CFRP no interior dos furos após a rotura do modelo V7 (EBRA)



Figura 5.50: Fendas na zona traccionada e esmagamento do betão na viga V7 (EBRA)

Tal como nas vigas ensaiadas monotónicamente, verificou-se nos ensaios cíclicos que através da técnica EBRA é possível mobilizar toda a capacidade resistente dos laminados de CFRP. Como se verifica pelo corte longitudinal da viga V7, na zona da amarração de um dos laminados de CFRP (Figura 5.51), não são visíveis sinais de ocorrência de problemas de aderência, quer na ligação

Betão-Resina quer na ligação Resina-CFRP. Na mesma figura são também visíveis duas fendas de corte (assinaladas a vermelho) aproximadamente perpendiculares ao laminado de CFRP.

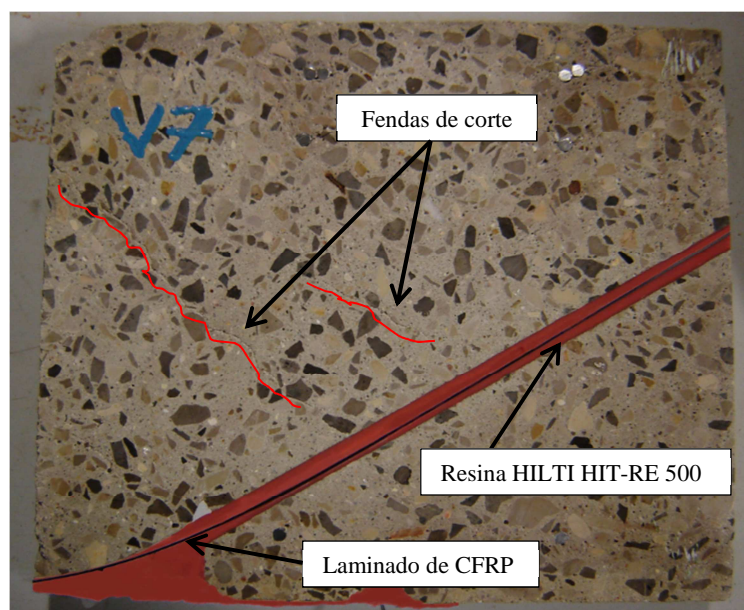


Figura 5.51: Corte longitudinal na zona de amarração do CFRP da viga V7

Quanto ao ensaio do modelo reforçado com a técnica HNSMR (V10), verificaram-se pequenas diferenças no respectivo modo de rotura. Neste caso após o desenvolvimento da fenda longitudinal verificou-se a rotura do laminado no interior do rasgo sem que o betão de recobrimento destacasse ou o elemento de CFRP escorregasse, tal como se presenciou no ensaio monotónico do modelo V9 (Figura 5.52). A maior distância entre o laminado de CFRP e a base da viga ou mesmo uma limpeza mais adequada da superfície do laminado antes de este ser introduzido no respectivo rasgo, podem ter estado na origem de um ligeiro retardamento do destacamento do betão e do escorregamento do material compósito, permitindo a este alcançar a respectiva capacidade resistente antes de tais fenómenos acontecerem.



Figura 5.52: Rotura do laminado de CFRP no interior do rasgo do modelo V10 (HNSMR)

5.3 Análise dos resultados experimentais

5.3.1 Força versus Deslocamento

Com o objectivo de compreender o desempenho das diferentes soluções de reforço apresentadas neste trabalho, é importante proceder à análise das diversas fases observadas nos diagramas Força vs Deslocamento. Estas fases traduzem os quatro regimes de comportamento possíveis de uma viga de betão armado reforçada com laminados de CFRP, os quais se podem enumerar por ordem cronológica da seguinte forma:

- I. Regime elástico ou de pré-fendilhação (comportamento elástico de todos os materiais);
- II. Regime de pós-fendilhação (comportamento elástico do aço e CFRP);
- III. Regime de pós-cedência (comportamento plástico do aço e elástico do CFRP);
- IV. Regime de pós-rotura (rotura do CFRP e comportamento plástico do aço)

A estas fases acrescentam-se também os respectivos instantes que limitam os regimes de comportamento referidos e que compreendem a fendilhação do betão (A), cedência das armaduras (B) e a rotura do sistema (C). Todas as fases anteriormente referidas podem ser observadas através da Figura 5.53 que representa o diagrama Força vs Deslocamento característico de uma viga de betão armado reforçada com laminados de CFRP.

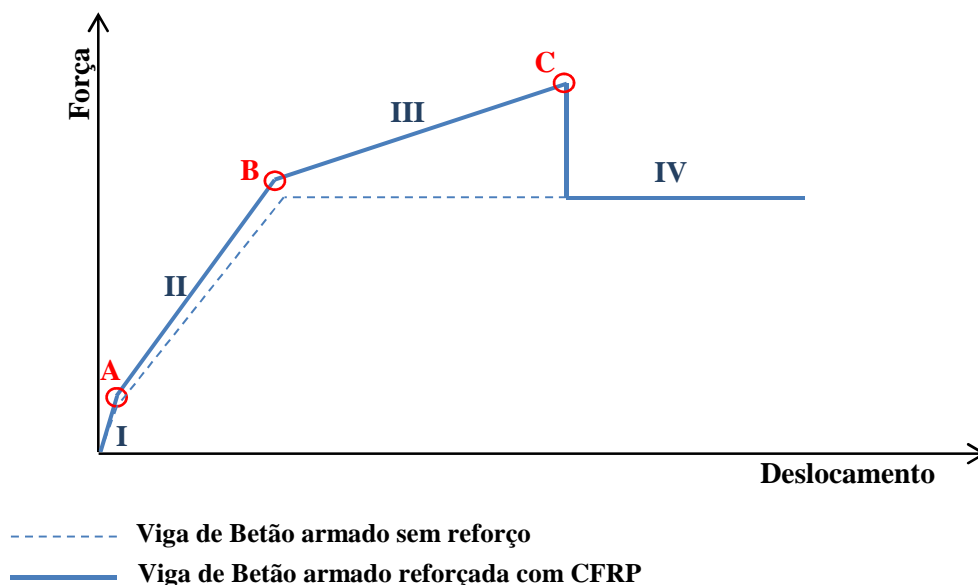


Figura 5.53: Diagrama Força vs Deslocamento característico de uma viga de betão armado reforçada com laminados de CFRP

5.3.1.1 Regime elástico ou de pré-fendilhação

O regime elástico ou de pré-fendilhação corresponde à fase do desempenho da viga onde todos os materiais apresentam um comportamento elástico e linear. Sendo a primeira e mais curta de todas as fases do comportamento da viga, esta considerou-se de difícil análise possivelmente devido a folgas do sistema de ensaio existentes no início do carregamento que, em conjunto com a insuficiente sensibilidade dos equipamentos de quantificação das cargas aplicadas, tornou difícil a aquisição dos valores. Como tal, não foi possível realizar a análise ao regime elástico ou de pré-fendilhação do diagrama Força vs Deslocamento obtido.

No entanto, através da análise da diferença de declives dos diagramas Força vs Deslocamento obtidos para cada modelo, foi possível identificar o instante correspondente à fendilhação do betão.

No que diz respeito à fendilhação dos modelos ensaiados com carregamento monotónico verificou-se que à exceção do modelo não reforçado (V1), que fendilhou para um momento flector de 3,2 kN, todos apresentaram valores de momento flector semelhantes no instante referido ($M_{crV6} = 4,71 \text{ kN.m}$, $M_{crV8} = 4,56 \text{ kN.m}$, $M_{crV9} = 4,63 \text{ kN.m}$). O acréscimo do momento de fendilhação dos modelos V6, V8 e V9 em relação ao verificado na viga de referência (V1) está associada à presença adicional de elementos de CFRP com funções de reforço que, devido à sua elevada rigidez, provocam uma redução global das tensões na zona traccionada da secção adiando assim o surgimento deste instante.

5.3.1.2 Regime de pós-fendilhação

O regime de pós-fendilhação corresponde à fase que surge quando o betão perde o seu comportamento linear, ou seja, após a sua fendilhação. Nesta fase, para uma viga de betão armado reforçada com elementos de CFRP, o betão encontra-se fendilhado e as armaduras de aço e o material compósito permanecem em regime elástico e linear. De facto, tal como se verificou em trabalhos experimentais como os de Carvalho [3] ou Biscaia [2], apesar da habitual diminuição de rigidez de flexão numa viga após a fendilhação do betão, a mesma tende a aumentar quando o elemento estrutural é reforçado com materiais compósitos de FRP. Tal aumento dependerá, como se compreende, de factores como o tipo de material compósito utilizado ou a percentagem/quantidade de reforço aplicado.

É possível observar este fenómeno através da Figura 5.54, no qual é apresentada a fase correspondente ao regime de pós-fendilhação dos modelos testados com carregamento monotónico.

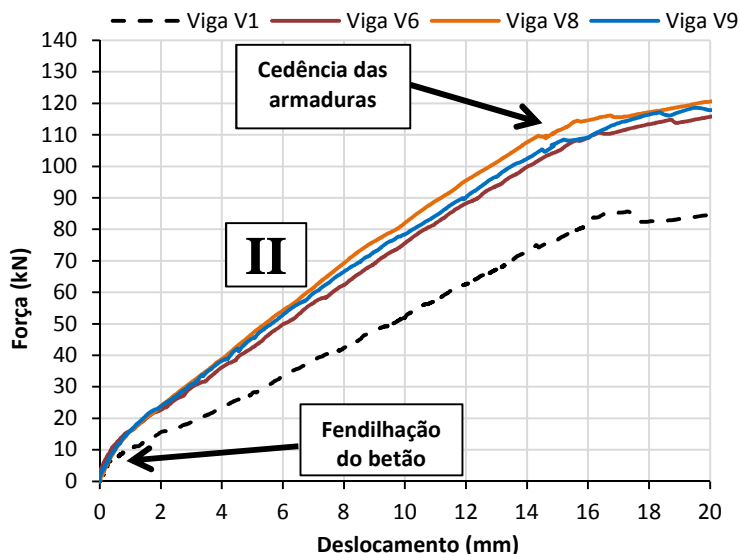


Figura 5.54: Regime de pós-fendilhação e instante de cedência das armaduras dos modelos ensaiados

Analisando a Figura 5.54, é possível constatar que após a ocorrência da fendilhação do betão, surgem as primeiras discrepâncias ao nível das relações Força vs Deslocamento dos modelos em estudo. Comparando o modelo da viga de referência (V1) com os restantes verifica-se um considerável aumento de rigidez no regime de pós-fendilhação devido à existência de reforço. Em relação aos dois modelos reforçados com a mesma técnica (V6 e V8), é notória a diferença de rigidez possivelmente causada pela colagem não totalmente paralela dos laminados de CFRP, uns em relação aos outros. Note-se que mesmo o modelo V9, cuja viga foi reforçada com a técnica HNSMR, apresenta rigidez superior à verificada no modelo V6.

No que diz respeito à cedência, é possível verificar através da análise da Figura 5.54 e da Tabela 5.1 que em relação à viga de referência, os modelos das vigas reforçadas com laminados de CFRP conduziram a um incremento no momento de cedência de 28,7 % na viga V8 ($M_y = 55 \text{ kN.m}$) e de 27 % na viga V9 ($M_y = 54,3 \text{ kN.m}$). Já na viga V6, apesar da incorreta colocação dos laminados de CFRP, esse incremento também se observou em 28,4 % ($M_y = 54,9 \text{ kN.m}$).

5.3.1.3 Regime de pós-cedência

O regime de pós-cedência diz respeito à fase que surge após o instante da cedência das armaduras. Esta fase termina assim que os elementos de reforço deixam de contribuir para a resistência do sistema global devido a roturas prematuras de diversos tipos ou mesmo à rotura do próprio material. Nesta fase apenas o laminado de CFRP permanece com comportamento elástico e linear,

razão pela qual esta pode ser considerada a fase mais importantes para avaliar o desempenho de uma técnica de reforço.

Como se pode observar na Figura 5.55, os três modelos testados com carregamento monotónico apresentaram ligeiras diferenças no regime de pós-cedência, sendo as mesmas devido ao tipo de técnica de reforço ou ao facto de se terem cometido irregularidades na aplicação dos elementos de CFRP.

A rotura dos modelos V8 (EBRA) e V9 (HNSMR) ocorreu para valores de deslocamento a meio vão de 55,5 mm e 58,65 mm, respectivamente. A técnica EBRA proporcionou ao sistema um maior incremento de força desde a cedência das armaduras até à rotura do mesmo. A técnica HNSMR apresentou melhor comportamento no que respeita à ductilidade do sistema ao longo desta fase. O modelo V8 (EBRA) teve um incremento de carga de 37% e o modelo V9 (HNSMR) um aumento de 33,54% da força aplicada. É importante salientar também a perda no incremento da força desde a cedência das armaduras até à rotura bem como a menor ductilidade da fase III no modelo V6 em relação à viga V8.

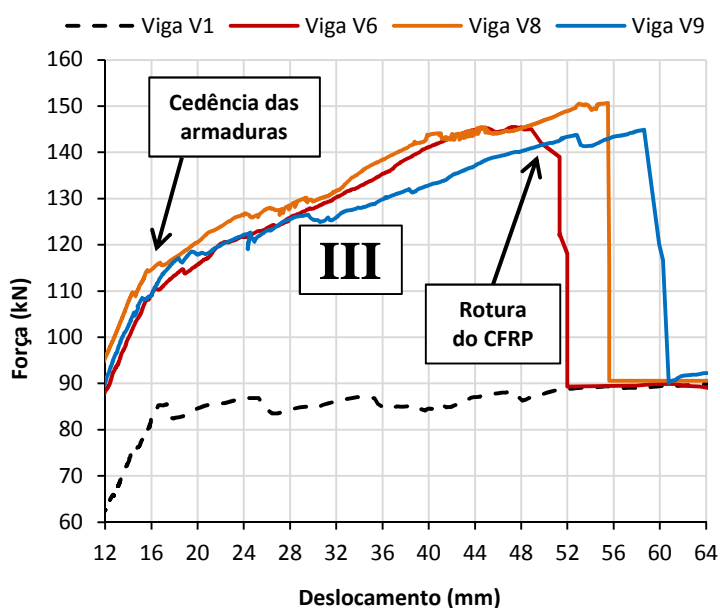


Figura 5.55: Regime de pós-cedência dos modelos ensaiados

Através da análise da Figura 5.55 é possível constatar que o modelo reforçado com a técnica EBRA (V8) permitiu alcançar maior carga no instante da rotura que o modelo reforçado com a técnica HNSMR (V9). Com base no momento de cedência da viga V1 ($M_y = 42,75 \text{ kN}$), o modelo V8 registou um aumento de 76,1% no seu momento de rotura ($M_r = 75,35 \text{ kN}$) enquanto o modelo V9 não excedeu os 69,5% do mesmo valor ($M_r = 72,45 \text{ kN}$). É também notória a diferença, em

relação ao modelo V8, que possivelmente o incorreto posicionamento dos laminados de CFRP da viga V6 provocaram no respectivo valor da carga de rotura. Para o caso do modelo V6, o momento flector neste instante não foi além dos 70,1%, relativamente ao momento de cedência da viga V1.

5.3.1.4 Regime de pós-rotura

Na fase final do ensaio, após a rotura dos laminados de CFRP e quando as armaduras de aço permanecem em regime plástico, as vigas tendem a apresentar um comportamento igual ou semelhante ao modelo testado sem qualquer reforço. É espectável por isso que todos os modelos ensaiados, incluindo a viga de referência, apresentem valores semelhantes de deformação a meio vão com a mesma carga máxima correspondente ao momento de cedência dos mesmos.

Para confirmar este facto é apresentado a Figura 5.56, no qual se pode observar o regime de pós-rotura dos modelos testados.

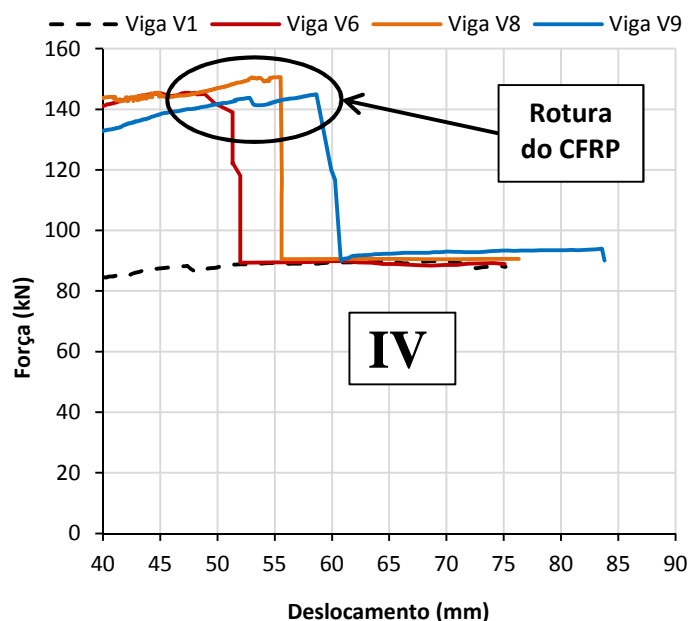


Figura 5.56: Regime de pós-rotura dos modelos ensaiados

Analisando a Figura 5.56, constata-se que logo após a ocorrência da rotura do sistema de reforço, a carga decresce rapidamente alcançando valores semelhantes aos obtidos após a cedência das suas armaduras da viga de referência. Com isto, conclui-se que todos os modelos apresentaram características idênticas em termos geométricos e de materiais.

5.3.1.5 Ensaios cíclicos vs Ensaios monotónicos

Através de uma análise comparativa entre os modelos testados com carregamento cíclico e os modelos ensaiados com carregamento monotónico de cada técnica é possível avaliar o desempenho das mesmas perante situações de serviço. Como tal, são de seguida apresentadas as Figuras 5.57 e 5.58 nas quais se confrontam os diagramas Força vs Deslocamento a meio vão obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos de cada técnica. É importante referir que para esta análise se utilizou apenas a viga V8 como modelo representativo do ensaio monotónico do sistema EBRA. Com o objectivo de sintetizar os principais dados desta comparação é apresentada ainda a Tabela 5.7.

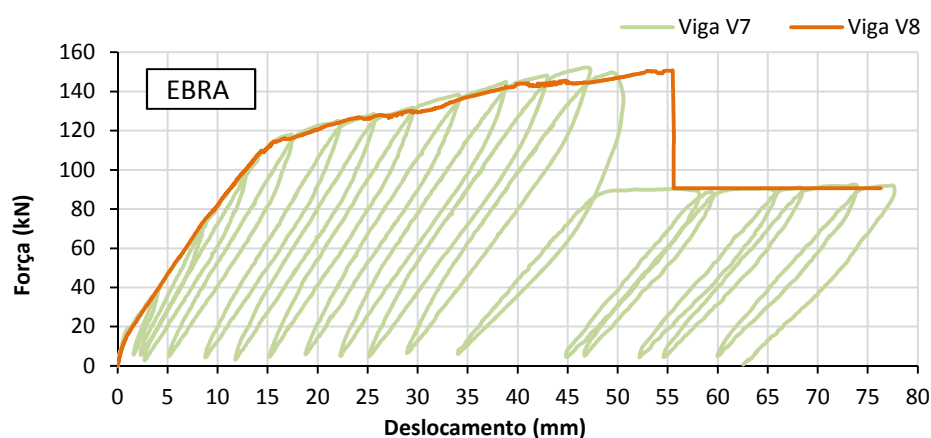


Figura 5.57: Relação Força vs Deslocamento dos modelos V7 (cíclico) e V8 (monotónico)

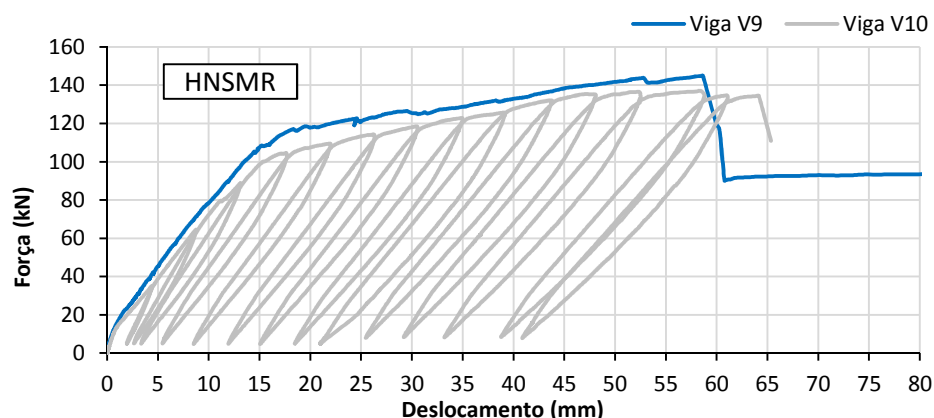


Figura 5.58: Relação Força vs Deslocamento dos modelos V9 (monotónico) e V10 (cíclico)

Modelo	F_y (kN)	ΔF_y (%)	δ_y (mm)	$\Delta \delta_y$ (%)	F_r (kN)	ΔF_r (%)	δ_{Fr} (mm)	$\Delta \delta_{Fr}$ (%)
V8 (Monotónico)	110	-	14,80	-	150,70	-	55,5	-
V7 (Cíclico)	113,71	+3,37	15,34	+3,65	149,81 ($M_{\acute{a}x} = 152,23$)	-0,59 ($M_{\acute{a}x} = +1,02$)	49,5 ($F_{max} = 46,8$)	-10,8 ($F_{max} = -15,7$)
V9 (Monotónico)	108,5	-	15,65	-	144,89	-	58,65	-
V10 (Cíclico)	100,04	-7,8	15,33	-2,04	134,44 ($M_{\acute{a}x} = 137,03$)	-7,21 ($M_{\acute{a}x} = -5,40$)	64,2 ($F_{max} = 58,4$)	+9,5 ($F_{max} = -0,36$)

Tabela 5.7: Comparação entre o desempenho dos modelos monotónicos e cíclicos para cada técnica de reforço

Analisando as Figuras 5.57 e 5.58, verifica-se que o tipo de carregamento não teve grande influência na resistência dos modelos testados, podendo concluir-se que as técnicas em análise foram eficientes quer para cargas monotónicas, quer para cargas cíclicas.

Na técnica EBRA, verifica-se que tanto a força como o deslocamento vertical a meio vão no instante da cedência das respectivas armaduras foram praticamente coincidentes, proporcionando um aumento de apenas 3,37% na força aplicada e de 3,65% no respectivo deslocamento. Contudo, apesar do carregamento cíclico ter provocado um aumento de 1,02% na força máxima, o deslocamento na rotura e o deslocamento correspondente à força máxima revelaram-se inferiores aos obtidos no modelo testado com carregamento monotónico (-10,8 e -15,7%, respectivamente).

Na técnica HNSMR, as diferenças de posicionamento dos laminados de CFRP nos rasgos das vigas V9 e V10 com distâncias de, respectivamente, 2,5 e 5 centímetros em relação à base das mesmas, pode ter sido a causa das discrepâncias verificadas ao nível da força de cedência e da força máxima atingida. Contudo, a natureza cíclica do carregamento não provocou discrepâncias consideráveis nos deslocamentos verticais a meio vão, quer na cedência quer na rotura, sendo ambas inferiores a 10% (-2,04 e +9,5%, respectivamente).

5.3.2 Deformada da viga

A análise dos deslocamentos verticais observados nos modelos ensaiados é também de grande importância para avaliar a influência das diferentes técnicas de reforço na deformada das vigas em estudo. A análise aqui tratada passará pela comparação dos deslocamentos verticais observados em cada modelo testado em diferentes instantes dos ensaios realizados.

Na Figura 5.59, são representadas as deformadas da viga V1 e dos modelos reforçados com laminados de CFRP para o nível de carga igual à cedência das armaduras da viga de referência (V1).

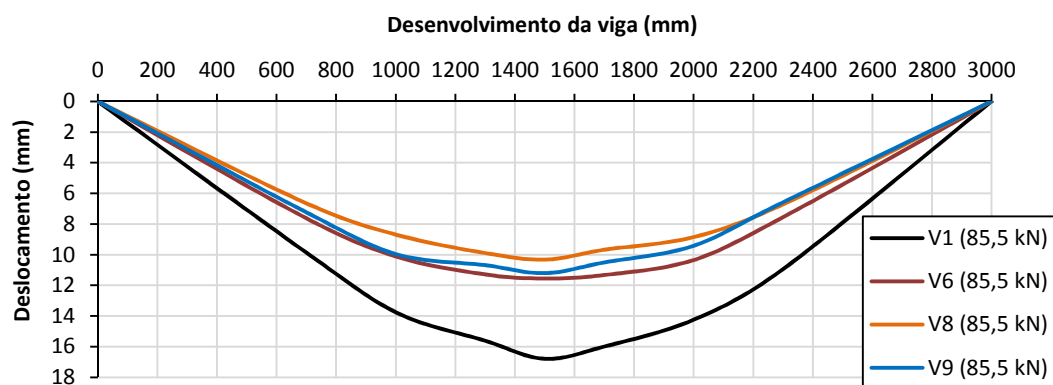


Figura 5.59: Deformada dos modelos V1 (referência), V6 (EBRA), V7 (EBRA), V8 (EBRA) e V9 (HNSMR) para o instante da carga de cedência das armaduras do modelo de referência (85,5 kN)

Através da análise da Figura 5.59 é possível verificar o que já se referiu no anterior sub-capítulo e que diz respeito ao incremento de rigidez que os elementos de CFRP impuseram nos respectivos elementos estruturais reforçados. Para a mesma carga aplicada ($F=85,5 \text{ kN}$) todos os modelos reforçados apresentaram um deslocamento vertical a meio vão inferior ao observado na viga de referência ($\delta_{yV1} = 16,79 \text{ mm}$).

No sentido de analisar e comparar os instantes de cedência das armaduras e rotura entre os modelos reforçados é apresentada a Figura 5.60, na qual se reproduzem as deformadas das referidas vigas para os instantes em causa. No referido gráfico é ainda apresentada a deformada correspondente à cedência das armaduras da viga de referência (V1).

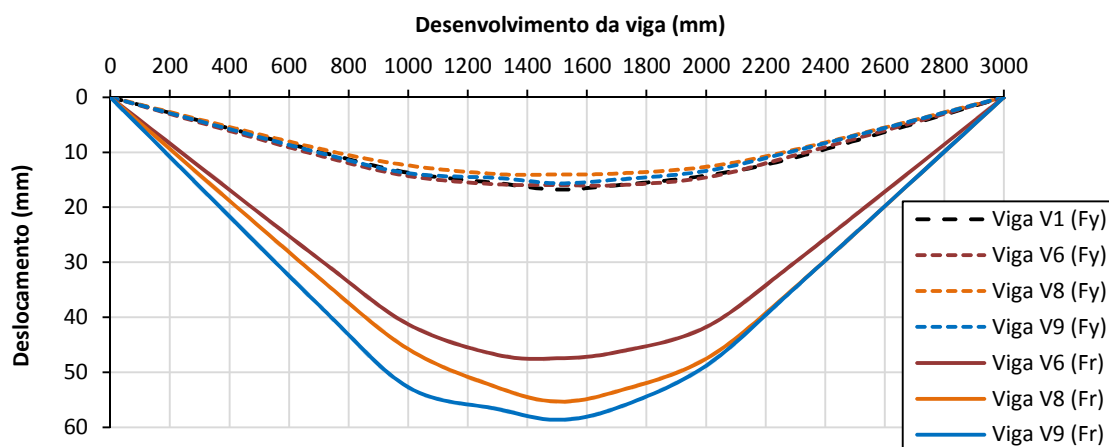


Figura 5.60: Deformada dos modelos V1, V6, V7, V8 e V9 na cedência das armaduras e na rotura do CFRP

Analisando a Figura 5.60 é possível verificar que todas as vigas apresentaram deformações quase semelhantes no instante da cedência das armaduras. A variabilidade existente entre as vigas V6 e

V8 deve-se essencialmente ao facto de os laminados de CFRP na viga V6 não estarem totalmente alinhados entre si. Por outro lado, é visível pela mesma análise que as maiores diferenças surgem no instante da rotura do laminado de CFRP, sendo por isso importante analisar o incremento de deformação desde a cedência das armaduras que cada sistema de reforço permitiu até ser atingida a respectiva rotura (Tabela 5.8).

Modelo	δ_y (mm)	δ_r (mm)	Incremento de y a r (%)
V6	16,1	47,2	+193
V8	14,8	55,5	+275
V9	15,7	58,7	+275

Tabela 5.8: Incremento de deformação entre a cedência das armaduras e a rotura do CFRP dos modelos V6, V8, V9

Da análise da Tabela 5.8 é possível constatar que o fenómeno de rotura prematura observado no modelo reforçado com a técnica HNSMR (V9) não prejudicou significativamente a deformada da viga no instante de rotura do sistema. Tal facto pode ser verificado atendendo ao incremento de deformação a partir da cedência (+275%) entre o modelo V8 (sem roturas prematuras) e o modelo V9 (com rotura prematura). Em termos globais, é possível verificar o excelente comportamento, quer em termos de capacidade de deformação quer de resistência, salientando-se ainda o facto da técnica EBRA ter apresentado cargas superiores às obtidas com a técnica HNSMR e deformações bastante superiores na rotura, na ordem de $l/54$.

De forma a analisar a influência do carregamento cíclico na deformada dos modelos reforçados com as duas técnicas em estudo são apresentadas de seguida as Figuras 5.61 e 5.62.

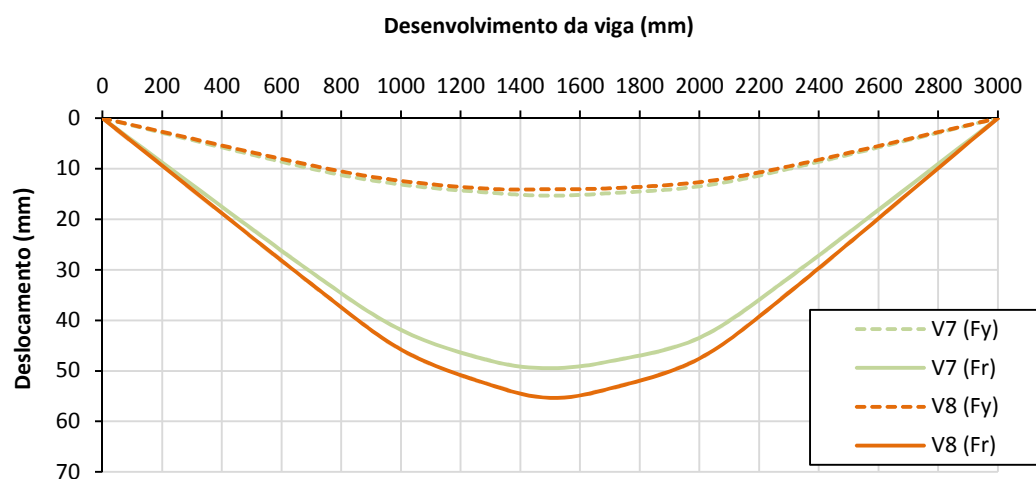


Figura 5.61: Deformada dos modelos V7 (cíclico) e V8 (Monotónico)

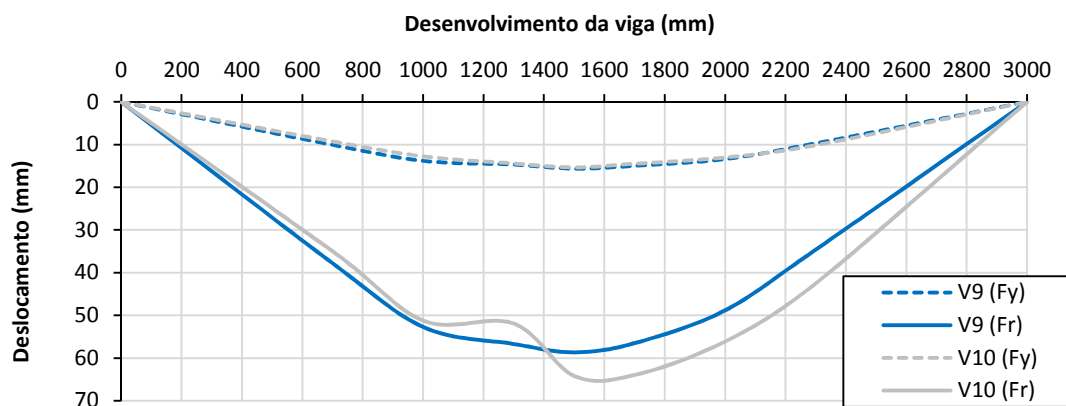


Figura 5.62: Deformada dos modelos V9 (Monotónico) e V10 (Cíclico)

Analisando as Figuras 5.61 e 5.62, representativas dos modelos reforçados com as técnicas EBRA e HNSMR, respectivamente, são notórias as diferenças dos deslocamentos verticais apenas na rotura dos sistemas. No que diz respeito à técnica EBRA, ao contrário do instante de cedência das armaduras em que o grau de deformação foi semelhante em ambos os modelos, a rotura do modelo V7 (cíclico) deu-se para valores de deslocamentos verticais inferiores aos observados no modelo V8 (monotónico). O contrário se verificou para a técnica HNSMR, onde na rotura o modelo testado ciclicamente (V10) apresentou valores de deslocamentos verticais a meio vão superiores aos obtidos na viga V9 (monotónica). Tal como foi comentado anteriormente, registaram-se para as cargas de rotura das vigas V7 (EBRA) e V10 (HNSMR) deslocamentos verticais a meio vão com discrepâncias de, respectivamente, -10,8% e +9,5%, comparativamente aos respectivos modelos testados monotonicamente (V8 e V9).

5.3.3 Extensão nos laminados de CFRP

O grau de utilização dos laminados de CFRP, bem como os níveis de deformação dos mesmos ao longo dos ensaios são parâmetros importantes do comportamento do material de reforço na avaliação da eficácia das técnicas de reforço em estudo. Como tal, será feita de seguida a análise dos dados obtidos através dos extensómetros colados na superfície dos laminados de CFRP. A análise das deformações será apresentada ao longo dos laminados com comprimentos de 3,2 m nas vigas V6, V7 e V8 e de 3,3 m nas vigas V9 e V10.

A Figura 5.63 representa o diagrama das extensões ao longo do comprimento total de cada laminado de CFRP instrumentado para cada modelo ensaiado com a técnica EBRA.

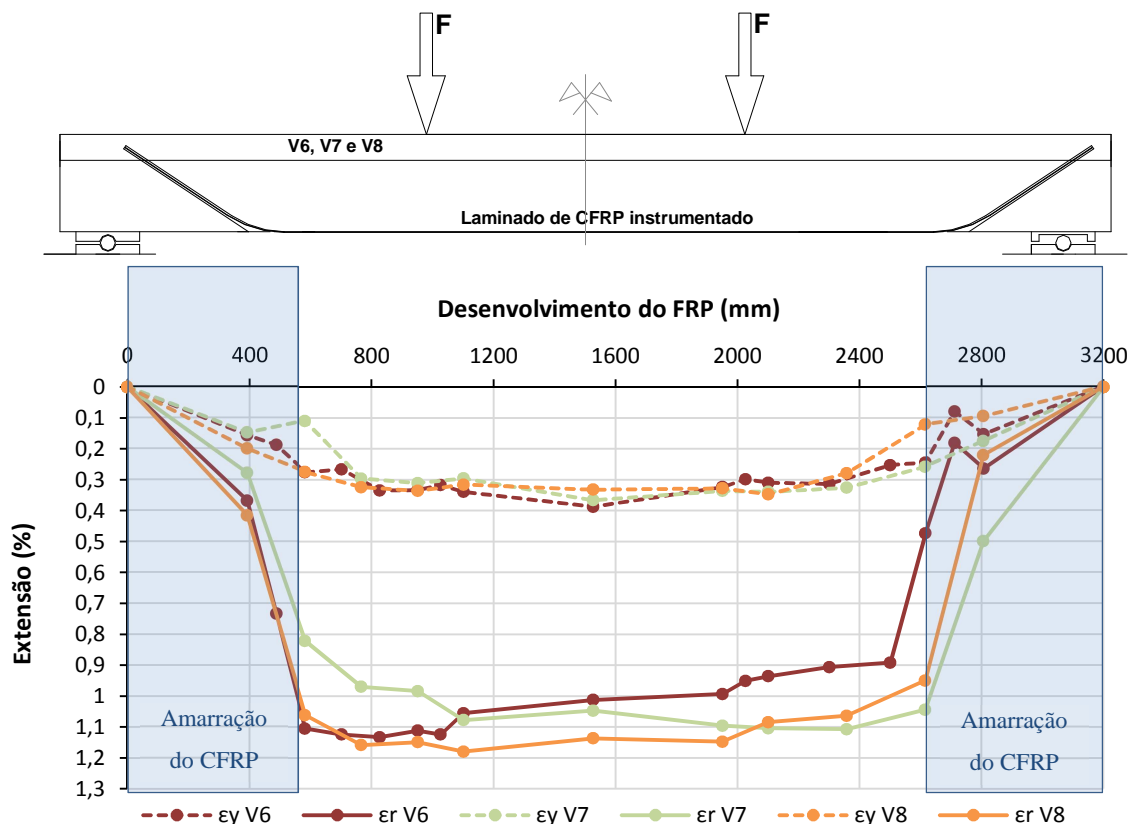


Figura 5.63: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP dos modelos reforçados com a técnica EBRA (V6, V7, V8)

Observando a Figura 5.63 verifica-se que ao nível da cedência das armaduras todos os laminados apresentaram deformações semelhantes. Por outro lado, verifica-se que as extensões medidas na rotura do CFRP excedem o valor da extensão última do laminado, observando-se neste instante as maiores diferenças nas deformações do CFRP. Enquanto o laminado de CFRP do modelo V7 (cíclico) foi o que rompeu para uma extensão menor (1,11%), o da viga V8 (monotónico) foi o que apresentou maior extensão na rotura, atingindo uma extensão de 1,18%. Note-se ainda que ao longo dos ensaios, os laminados de CFRP nunca atingiram grandes níveis de deformação no interior dos furos de amarração (localizados entre 0-582mm e 2617-3200mm na Figura 5.63). Um pormenor bastante interessante diz respeito ao facto das maiores extensões do CFRP se verificarem a meio vão até à cedência das armaduras, sendo que após este instante os maiores níveis de deformação dos laminados começam a deslocar-se para as zonas de formação das rótulas plásticas. Este facto pode ser explicado pelo descolamento do CFRP nestas zonas, que após o referido fenómeno o diagrama de extensões no laminado deixa de acompanhar a configuração do diagrama de momentos flectores da respectiva viga.

No que toca à técnica HNSMR, é apresentada a Figura 5.64 representativa do nível de deformação dos laminados de CFRP para os instantes de cedência das armaduras e rotura dos mesmos.

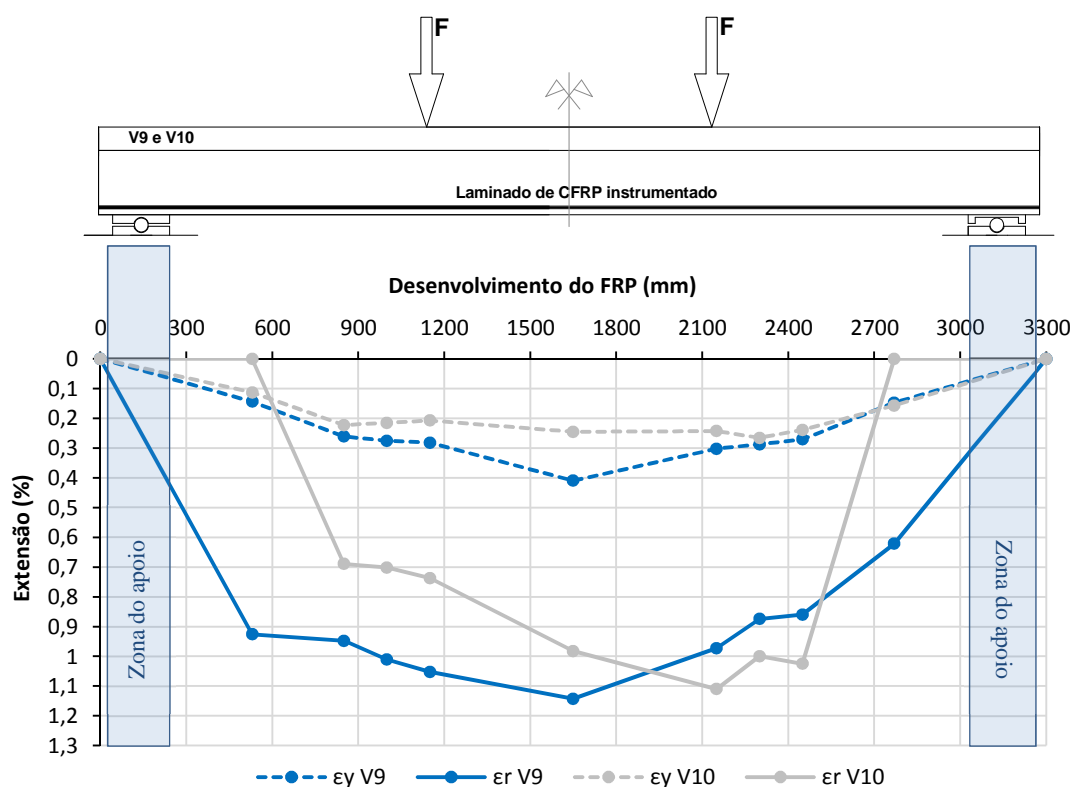


Figura 5.64: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP dos modelos reforçados com a técnica HNSMR (V9, V10)

De acordo com a Figura 5.64, são notórias as diferenças que o tipo de carregamento provocou no nível de deformação dos laminados de CFRP. No instante da cedência das armaduras, enquanto a deformação máxima do CFRP do modelo V9 (ensaiado monotonicamente) se deu a meio vão para valores iguais a 0,409%, no modelo V10 (ensaiado ciclicamente) isso não aconteceu tendo-se verificado as máximas extensões para valores iguais a 0,243%. Por outro lado, enquanto no modelo V9 a rotura prematura do CFRP ocorreu para um valor máximo de deformação de 1,14% no extensômetro colado a meio vão, no modelo V10 a rotura do CFRP ocorreu na zona da rótula plástica e para valores máximos de 1,11%. A diferente configuração dos laminados de CFRP nos dois sistemas de reforço veio, de igual forma, originar uma configuração das deformação diferente entre as técnicas EBRA e HNSMR, com a primeira a apresentar uma deformação mais uniforme na rotura em todo o laminado até à zona dos furos de amarração. Já no sistema HNSMR, a extensão nos laminados de CFRP vai diminuindo gradualmente do meio vão para as extremidades dos mesmos.

Com o objectivo de comparar o grau de deformação dos laminados de CFRP dos modelos monotónicos com a respectiva variação de momento flector a meio vão, é apresentada de seguida a Figura 5.65.

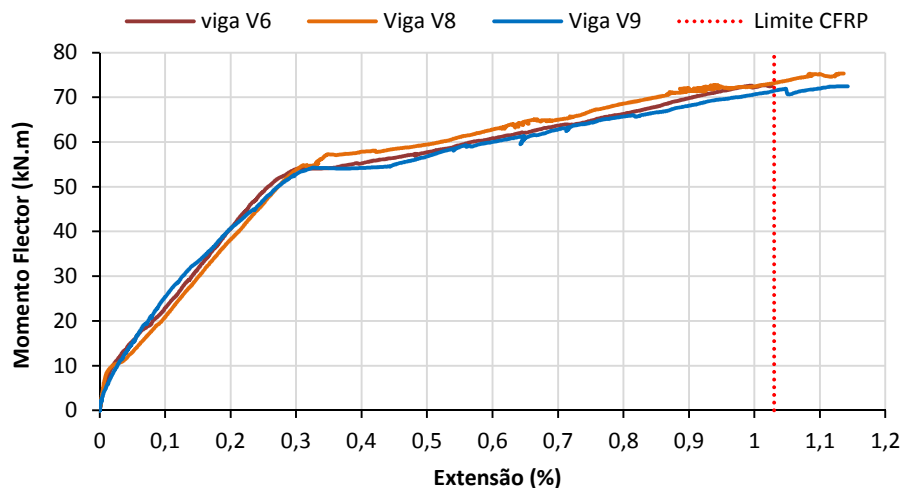


Figura 5.65: Relação momento flector vs extensão nos laminados de CFRP (meio vão) dos modelos V6, V8, V9

Com base na Figura 5.65, em que se mostra o diagrama Momento flector vs Extensão nos laminados de CFRP a meio vão das vigas V6, V8 e V9, é possível constatar uma semelhança bastante aceitável ao longo do ensaio em termos de comportamento global das vigas reforçadas.

5.3.4 EBRA vs EBR e HNSMR vs NSMR

Neste subcapítulo é feita uma análise comparativa entre as técnicas de reforço com e sem ancoragem. A referida análise será feita com base nos diagramas Força vs Deslocamento, Momento vs Extensão no CFRP, Deformada da viga e Deformada dos laminados de CFRP de cada técnica. Dos capítulos anteriores, recorde-se que as vigas V2 e V4 testadas por Carvalho [3], foram betonadas no mesmo dia que as vigas estudadas no âmbito do presente trabalho, apresentando geometria e armaduras idênticas a estas. O reforço da viga V2 foi realizado utilizando a técnica EBR através de um laminado de CFRP S&P 150/2000 com dimensões de $50 \times 1,4 \text{ mm}$ ao longo de um comprimento de 2,7 m. Após os respectivos ensaios de caracterização do CFRP para o sistema EBR, Carvalho [3] obteve um módulo de elasticidade de 170 GPa e uma extensão de rotura média de 1,05%. No que diz respeito à viga V4, esta foi reforçada utilizando a técnica NSMR através de 4 laminados idênticos aos que se utilizaram nas técnicas EBRA e HNSMR.

A Figura 5.66 mostra as relações Força vs Deslocamento das vigas V2, V6 e V8, testadas com carregamento monotónico. A primeira diz respeito ao sistema EBR, testado por Carvalho [3], enquanto as restantes representam a técnica de reforço EBRA.

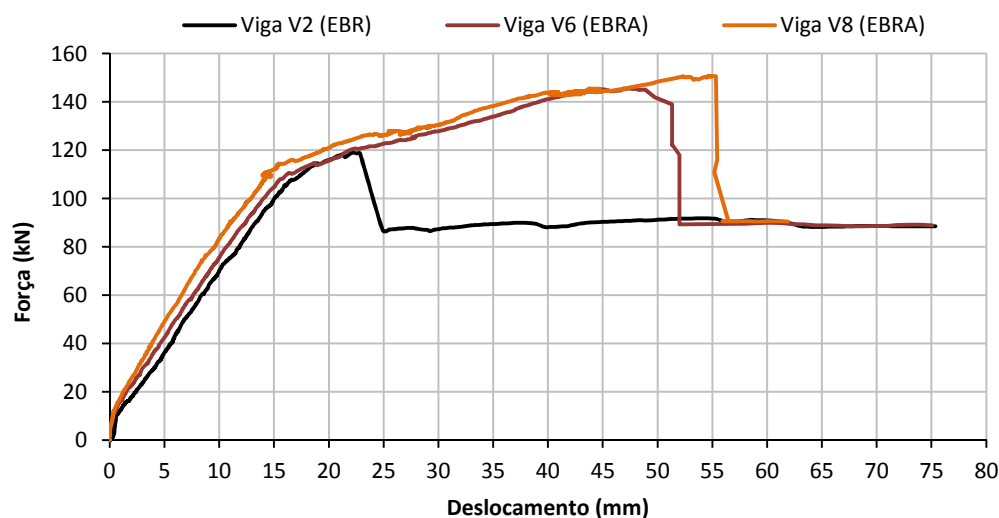


Figura 5.66: Relações Força vs Deslocamento a meio vão dos modelos V2 (EBR), V6 (EBRA) e V8 (EBRA) testados com carregamento monotónico

De forma a sintetizar os resultados mais importantes da Figura 5.66 é apresentada a Tabela 5.9 na qual são apresentados os deslocamentos e respectiva carga nos instantes da fendilhação, cedência e rotura dos modelos V2, V6 e V8.

Modelo	F_{cr} (kN)	Δ_{Fcr} (%)	δ_{cr} (mm)	F_y (kN)	Δ_{Fy} (%)	δ_y (mm)	F_r (kN)	Δ_{Fr} (%)	δ_r (mm)
V2	10,2	-	0,57	107,6	-	16,6	119	-	22,22
V6	9,41	-7,7 %	0,34	109,8	+2 %	16,14	145,5	+22,3 %	47,22
V8	9,11	-10,7 %	0,45	110	+2,2 %	14,8	150,7	+26,6 %	55,5

Tabela 5.9: Síntese dos valores obtidos de força e deslocamento a meio vão na cedência das armaduras e rotura para os modelos V2 (EBR) [3], V6 (EBRA) e V8 (EBRA)

Em termos globais, verifica-se pela análise da Figura 5.66 e da Tabela 5.9 que as vigas reforçadas com a técnica EBRA, desenvolvida no âmbito deste trabalho, apresentou um desempenho bastante melhor que a viga reforçada com o sistema EBR (V2). A viga V2 (EBR) apresentou uma rigidez menor até à cedência das armaduras, apesar da força de fendilhação ser ligeiramente superior que as das vigas V6 (EBRA) e V8 (EBRA). Uma das razões possíveis para esta diferença pode estar associada à idade do betão das vigas estudadas. Recorde-se que as vigas V6 e V8 foram ensaiadas aos 1336 e 1443 dias de idade enquanto a viga V2 foi testada apenas com 133 dias de idade, e

portanto os diferentes níveis de envelhecimento das vigas podem ter causado as discrepâncias verificadas na rigidez das vigas. Na fase de pós-fendilhação é também possível constatar que ambas as vigas reforçadas com a técnica EBRA, e em especial a viga V8, apresentaram maior rigidez neste ramo que o sistema EBR. No que se refere à cedência das armaduras, este instante foi atingido ligeiramente mais tarde com o sistema EBRA, tendo as vigas V6 e V8 apresentado, respectivamente, mais 2 % e 2,2 % de força neste instante que o modelo V2. Finalmente, é a partir da fase em que apenas o CFRP se comporta de forma elástica e linear que se verificam as maiores diferenças. Apesar das diferenças nas rigidezes dos sistemas já mencionadas se continuarem a observar na fase de pós-cedência, é através dos valores obtidos na rotura de cada modelo que é possível concluir que a técnica EBRA ofereceu um comportamento significativamente melhor que a técnica EBR. O sistema EBRA permitiu assim incrementos de força nos instantes de rotura dos modelos V6 e V8 de 22,3 % e 26,6 %, respectivamente. Realce-se que na viga V2, reforçada com o sistema EBR, a rotura foi prematura devido ao descolamento do laminado de CFRP, enquanto nas vigas V6 e V8 a rotura da viga deu-se por rotura dos laminados de CFRP.

No sentido de analisar comparativamente as técnicas NSMR e HNSMR, é apresentada de seguida a Figura 5.67, na qual se representam os respectivos diagramas Força vs Deslocamento a meio vão dos modelos das V4 e V9, testados com carregamento monotónico.

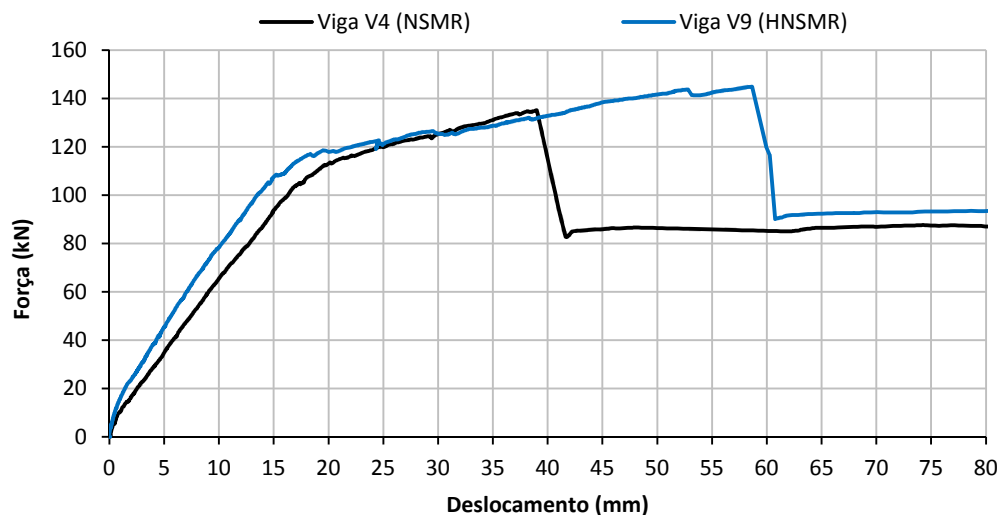


Figura 5.67: Relações Força vs Deslocamento a meio vão dos modelos V4 (NSMR), V9 (HNSMR) testados com carregamento monotónico

Com base na Figura 5.67 é apresentada a Tabela 5.10 onde são resumidos os resultados referentes aos instantes de cedência das armaduras e rotura dos modelos V4 e V9.

Modelo	F_{cr} (<i>kN</i>)	ΔF_{cr} (%)	δ_{cr} (<i>mm</i>)	F_y (<i>kN</i>)	ΔF_y (%)	δ_y (<i>mm</i>)	F_r (<i>kN</i>)	ΔF_r (%)	δ_r (<i>mm</i>)
V4	9,8	-	0,84	104,0	-	17	135,1	-	39,02
V9	9,3	-5,51 %	0,44	108,5	+4,3 %	15,65	144,9	+7,27 %	58,65

Tabela 5.10: Síntese dos valores obtidos de força e deslocamento a meio vão na cedência das armaduras e rotura para os modelos V4 (NSMR) e V9 (HNSMR)

Analisando a Figura 5.67 e a Tabela 5.10 verifica-se que, em termos globais, a técnica utilizada no reforço da viga V9 é mais eficiente, quer em termos de rigidez até à cedência quer em termos de comportamento na rotura. Refira-se contudo que o melhor desempenho do sistema HNSMR é em parte devido à geometria e às condições do ensaio. Em primeiro lugar porque no modelo V9 foi possível fazer a ancoragem para lá da zona dos apoios, o que é muito vantajoso em termos de amarração dada a possibilidade de mobilização da escora de compressão. Em segundo lugar porque o reforço foi realizado antes do carregamento da viga, situação que é difícil acontecer em obra onde normalmente a escora de compressão só será mobilizada para o incremento de carga a aplicar à viga reforçada.

Ainda segundo a Figura 5.67 e a Tabela 5.10 constata-se que a força no instante da fendilhação é relativamente semelhante nos dois ensaios, apesar do deslocamento correspondente na viga V9 ser cerca de metade do deslocamento na viga V4. Na fase de pós-fendilhação, a viga V9 reforçada com o sistema HNSMR continua a ser mais rígida que a viga V4 reforçada com a técnica NSMR. Na cedência das armaduras, o sistema NSMR apresentou maiores deslocamentos para uma carga ligeiramente inferior, comparativamente à técnica HNSMR. Após a cedência das armaduras é possível verificar que a técnica HNSMR (V9) apresentou maior ductilidade que a técnica NSMR (V4), sendo a sua rotura para valores de deslocamento a meio vão cerca de 50% superiores. Além disto, no instante da rotura, o sistema HNSMR permitiu um incremento de força de 7,27 % superior ao sistema NSMR.

Com o objectivo de analisar comparativamente a influência das técnicas estudadas na deformada das respectivas vigas, são apresentadas as Figuras 5.68 e 5.69 nas quais se representam os deslocamentos verticais medidos nos instantes da cedência das armaduras e rotura dos modelos ensaiados.

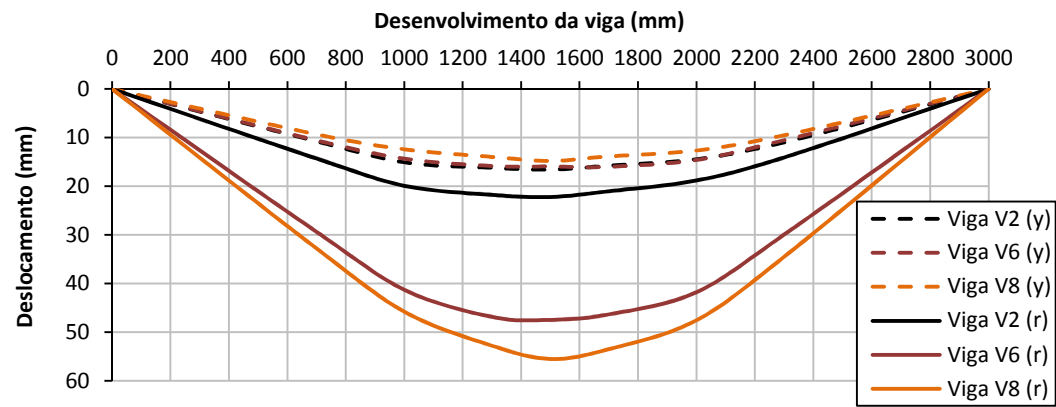


Figura 5.68: Deformada dos modelos V2 (EBR) [3], V6 (EBRA) e V8 (EBRA) na cedência das armaduras e na rotura do CFRP

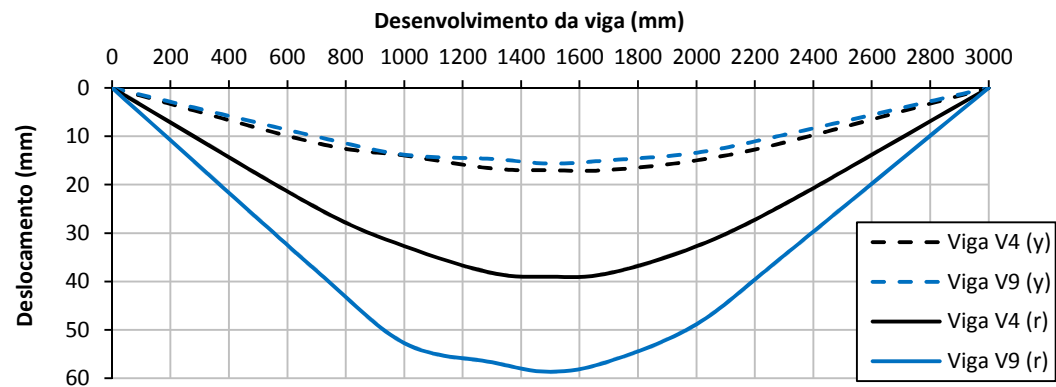


Figura 5.69: Deformada dos modelos V4 (NSMR) [3] e V9 (NSRMA) na cedência das armaduras e na rotura do CFRP

Na Tabela 5.11 sintetiza-se a informação constada nas Figuras 5.68 e 5.69, mostrando os resultados referentes aos incrementos de deslocamento vertical a meio vão, desde a cedência das armaduras até à rotura, que cada sistema permitiu no respectivo modelo testado.

Modelo	δ_y (mm)	δ_r (mm)	Incremento de y a r (%)
V2 (EBR)	16,6	22,2	+34
V4 (NSMR)	17,0	39,0	+130
V6 (EBRA)	16,1	47,2	+193
V8 (EBRA)	14,8	55,5	+275
V9 (HNSMR)	15,7	58,7	+275

Tabela 5.11: Incremento de deformação entre a cedência das armaduras e a rotura do CFRP dos modelos testados com carregamento monotónico

É possível confirmar, pela análise das Figuras 5.68 e 5.69, o andamento das deformadas das vigas ensaiadas com os diagramas já analisados de Força vs Deslocamento das mesmas. Ao nível da cedência das armaduras todas as vigas apresentaram deformações relativamente semelhantes, o que

deixou de acontecer após este instante. Ficou patente que os sistemas que incluíram uma zona de amarração do elemento de reforço (EBRA e HNSMR), permitiram tirar partido da totalidade da resistência à tração do CFRP, consentindo maiores níveis de carregamento até à rotura e consequentemente maiores deformações. Para além disto, o surgimento de roturas prematuras relativamente cedo nos modelos V2 (EBR) e V4 (NSMR) possibilitaram que os incrementos de deformação a meio vão desde a cedência até à rotura destes fossem significativamente inferiores aos detectados para os restantes sistemas.

A Figura 5.70 representa o nível de deformação ao longo do laminado de CFRP do modelo reforçado com a técnica EBR (V2) [3]. Através deste gráfico, e socorrendo-se do gráfico da Figura 5.63, é possível sintetizar na Tabela 5.12 os dados referentes às deformações máximas e grau de utilização do CFRP dos modelos V2 (EBR), V6 (EBRA) e V8 (EBRA).

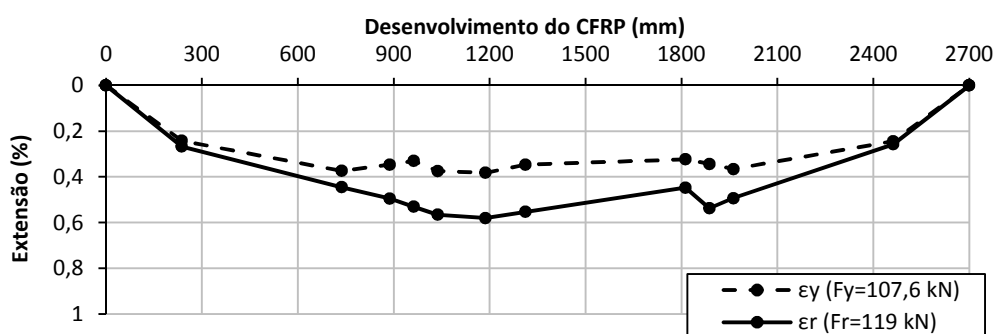


Figura 5.70: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP do modelo V2 (EBR)

Modelo	$\epsilon_{f,máx,y}$ (%)	$\epsilon_{f,máx,r}$ (%)	$\epsilon_{f,u}$ (%)	β_u (%)
V2	0,35	0,55	1,05	52,4
V6	0,39	1,13	1,03	>100
V8	0,35	1,18		>100

Tabela 5.12: Síntese dos principais valores obtidos de extensão no CFRP dos modelos V2 (EBR) [3], V6 (EBRA) e V8 (EBRA)

Através da análise das Figuras 5.70 e 5.63 e da Tabela 5.12, constata-se que no instante da cedência das armaduras os laminados dos modelos V2 (EBR), V6 (EBRA) e V8 (EBRA) apresentaram níveis de deformação semelhantes. Por outro lado, devido à ocorrência de roturas prematuras no modelo V2 (EBR), o sistema não permitiu que o elemento de reforço alcançasse a sua resistência total, ficando-se pelos 0,55 % de extensão. Pelo contrário, verificou-se nos modelos V6 (EBRA) e V8 (EBRA) a rotura dos laminados de CFRP com a consequente mobilização total dos mesmos, como era objectivo inicial. Desta forma, o sistema EBRA permitiu um grau de utilização total (β_u)

de 100 %, enquanto o modelo reforçado com a técnica EBR não foi além dos 52,4 % de utilização da respectiva extensão na rotura.

A Figura 5.71 mostra o nível de deformação do laminado de CFRP do modelo V4 [3] e na Tabela 5.13 são resumidos os principais valores de extensão no reforço obtidos nos modelos V4 (NSMR) [3] e V9 (HNSMR).

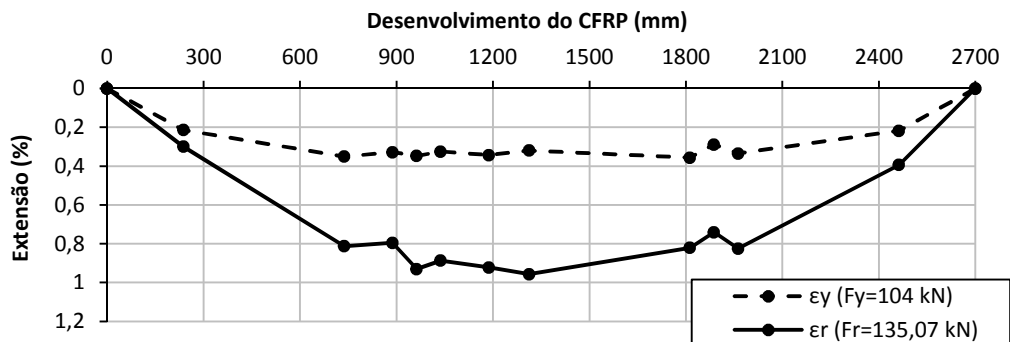


Figura 5.71: Extensão longitudinal nos laminados de CFRP do modelo V4 (NSMR)

Modelo	$\epsilon_{f,máx,y}$ (%)	$\epsilon_{f,máx,r}$ (%)	$\epsilon_{f,u}$ (%)	β_u (%)
V4	0,32	0,96	1,03	93,2
V9	0,409	1,143		111

Tabela 5.13: Síntese dos principais valores obtidos de extensão no CFRP dos modelos V4 (NSMR), V9 (HNSMR)

Da análise das Figuras 5.71 e 5.64 e da Tabela 5.13 verifica-se que, no instante da cedência das armaduras, os laminados de CFRP do sistema NSMR apresentaram maiores deformações que os laminados de CFRP utilizados no sistema HNSMR. Na rotura do modelo V4 as roturas prematuras que, segundo Carvalho [3] culminaram no destacamento do betão de recobrimento, não permitiram que os respectivos elementos de reforço atingissem a extensão última de tração. Pelo contrário o modelo V9 (HNSMR), que também colapsou devido a roturas prematuras, permitiu que os respectivos elementos de reforço atingissem a extensão última à tração média ($\epsilon_{f,u}$) dos laminados. Por fim, refira-se que os valores da extensão na rotura dos laminados de reforço das vigas V6 a V10 apresentam valores na rotura cerca de 10 a 15% superiores aos valores médios obtidos em ensaios à tração realizados por Carvalho [3]. Atendendo à ligeira discrepância observada, estes valores devem ser confirmados em futuros ensaios.

6. Modelação Numérica

6.1 Considerações gerais

Ao longo das últimas décadas tem-se verificado uma enorme evolução nas áreas da informática e electrónica traduzindo-se num aumento substancial da capacidade e velocidade dos computadores. Este facto tem sido aproveitado pela engenharia de estruturas no que diz respeito à realização de modelos de análise complexos capazes de aproximar cada vez melhor as suas soluções às situações reais verificadas. Com o auxílio de um conjunto de métodos tanto matemáticos como numéricos, estes modelos permitem realizar a análise bastante eficiente de diversas situações, permitindo ao mesmo tempo a utilização de um elevado número de variáveis e dados.

Com o objectivo de simular o problema em estudo, desenvolveu-se através do *software MATLAB* um programa de cálculo, a partir do qual foi construído o modelo numérico que será apresentado neste capítulo. Ao longo do mesmo são ainda apresentadas as leis constitutivas utilizadas para os materiais constituintes das vigas em estudo, bem como os critérios de rotura adoptados para o modelo produzido. Por forma a verificar a qualidade dos dados obtidos pela modelação numérica, procedeu-se à respectiva comparação com os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, tanto no âmbito desta dissertação, como nos trabalhos desenvolvidos por Carvalho [3].

6.2 Leis constitutivas dos materiais

6.2.1 Aço

Para caracterizar o comportamento dos varões de aço utilizados como armaduras de betão, existem diversos modelos. No caso presente, optou-se por considerar o modelo proposto em 1975 por Park e Pauley (Figura 6.1) para a lei constitutiva dos varões longitudinais de aço laminado a quente utilizados nas vigas em estudo.

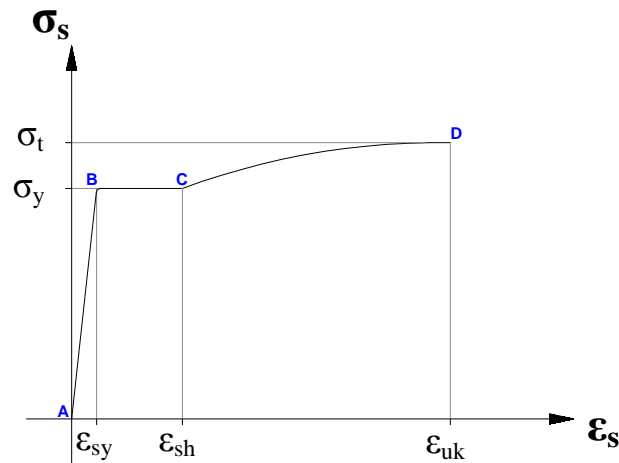


Figura 6.1: Diagrama tensão-deformação correspondente ao modelo analítico de Park-Pauley (1975)
[adaptado de 30]

Este modelo analítico, que procura caracterizar o comportamento monotónico dos varões de aço, é constituído por três troços. O primeiro (AB) corresponde à fase elástica do material, cujo declive corresponde ao seu módulo de elasticidade (E_s) e é definido através da Eq.6.1. O segundo troço (BC), cujas extensões variam desde a extensão de cedência (ϵ_{sy}) até à extensão de endurecimento (ϵ_{sh}), mantendo constante o respectivo valor de tensão Eq.6.2, corresponde ao patamar de cedência. Por fim, o terceiro e último troço (CD) definido pela Eq.6.3, diz respeito à fase de endurecimento característica do aço, cujo seu ponto máximo é atingido quando a tensão de rotura do aço (σ_t) e a respectiva extensão de rotura (ϵ_{uk}) são alcançados.

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s \quad (6.1)$$

$$\sigma_s = \sigma_y \quad (6.2)$$

$$\sigma_s = \sigma_y \cdot \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] \quad (6.3)$$

onde,

$$m = \frac{\frac{\sigma_t}{\sigma_y} (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (6.4)$$

e,

$$r = \epsilon_s - \epsilon_{sh} \quad (6.5)$$

6.2.2 Betão

O betão é considerado um material cujas deformações em compressão são verificadas segundo um regime inelástico. A rotura do betão pode ocorrer tanto por tração (roturas frágeis) como por compressão (roturas dúcteis).

Como tal, para modelar o betão em compressão, optou-se pela utilização do modelo de comportamento de betão simples destinado a análises não-lineares proposto pelo Eurocódigo 2 [69] (Figura 6.2). Segundo o mesmo Eurocódigo, a extensão última (ε_{cu1}) é atingida para valores de 0,35% e a extensão correspondente à tensão máxima (ε_{c1}) varia dependendo do valor da tensão de rotura à compressão do betão (f_{cm}). Este diagrama traduz a relação tensão-deformação para carregamentos uniaxiais de curta duração e é expresso de acordo com a Eq.6.6:

$$\sigma_c = f_{cm} \times \frac{K\eta - \eta^2}{1 + (K - 2)\eta} \quad (6.6)$$

onde η é um coeficiente que relaciona ε_c com ε_{c1} , dado por:

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (6.7)$$

e,

$$K = 1,05 \cdot E_{cm} \times \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad (6.8)$$

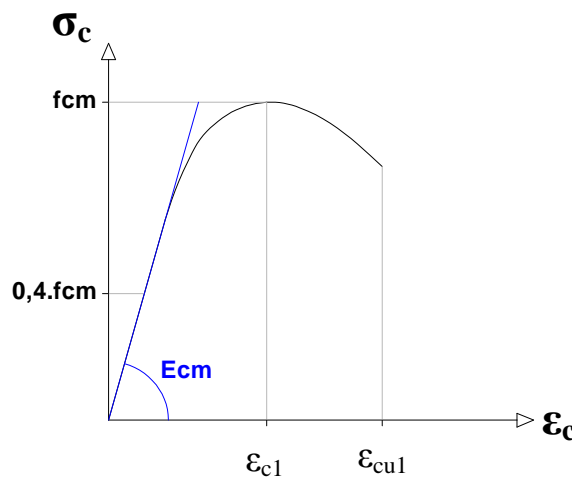


Figura 6.2: Modelo de betão simples à compressão para análise não-linear proposto pelo EC2 [adaptado 69]

Para proceder à modelação do comportamento do betão em tração recorreu-se ao diagrama tensão-deformação proposto pelo *Model Code 2010* [73] (Figuras 6.3 e 6.4).

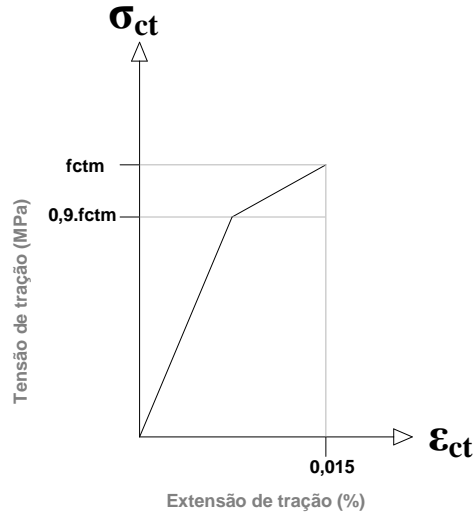


Figura 6.3: Relação tensão vs extensão proposta no MC 2010 [73] para a fase pré-fendilhada do betão

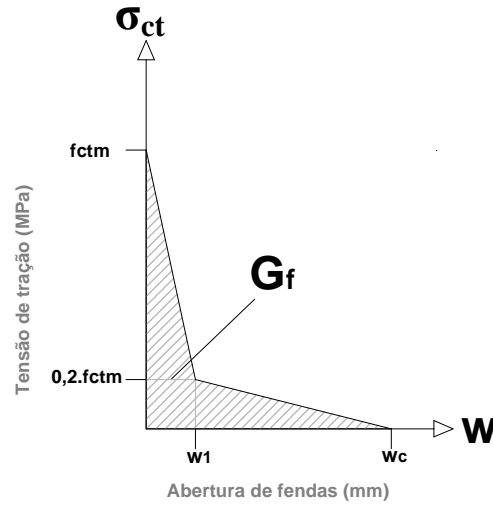


Figura 6.4: Relação tensão vs extensão proposta no MC 2010 [73] para a fase pós-fendilhada do betão

Segundo o *Model Code 2010* [73], o primeiro troço do diagrama (Figura 6.3), que relaciona a tensão de tração no betão (σ_{ct}) com a respectiva extensão (ϵ_{ct}), é definido de acordo com a expressão seguinte:

$$\sigma_{ct} = \begin{cases} E_{ci} \times \epsilon_{ct} & \text{se } \sigma_{ct} \leq 0,9f_{ctm} \\ \sigma_{ct} = f_{ctm} \left(1 - 0,1 \frac{0,00015 - \epsilon_{ct}}{0,00015 - 0,9 \frac{f_{ctm}}{E_{ci}}} \right) & \text{se } 0,9f_{ctm} < \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \end{cases} \quad (6.9)$$

onde,

$$E_{ci} = E_{co} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{10} \right)^{1/3} \quad (6.10)$$

em que, f_{ctm} corresponde à tensão de rotura à tração média do betão, E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente, $E_{co} = 21,5 \times 10^3 \text{ MPa}$ e α_E é um coeficiente que tem em conta o tipo de agregado do betão em estudo e é igual a 0,9, para o caso em estudo.

A relação tensão de tração (σ_{ct}) vs abertura de fendas (w) é traduzida no *Model Code 2010* [73], pela expressão:

$$\sigma_{ct} = \begin{cases} f_{ctm} \cdot \left(1 - 0,8 \frac{w}{w_1} \right) & \text{se } w \leq w_1 \\ f_{ctm} \cdot \left(0,25 - 0,05 \frac{w}{w_1} \right) & \text{se } w_1 < w \leq w_c \end{cases} \quad (6.11)$$

em que,

$$w_1 = \frac{G_f}{f_{ctm}} \quad (6.12)$$

$$w_c = 5 \cdot w_1 \quad (6.13)$$

onde, G_f é a energia de fractura do betão e w_1 e w_c são as aberturas de fendas para tensões no betão de $0,2f_{ctm}$ e 0, respectivamente.

Como mostra a Figura 6.4 é possível determinar a energia de fractura (G_f) através da área deste diagrama. No entanto, segundo o *Model Code 2010* [73], este parâmetro depende da resistência à compressão do betão (f_{cm}) e pode ser também determinado com base na Eq.14.

$$G_f = \int_0^{w_c} \sigma_{ct} \cdot dw \approx 73 \times f_{cm}^{0,18} \quad (6.14)$$

Sabendo que ao longo da distância correspondente ao espaçamento médio entre fendas (S_{rm}) se irá desenvolver apenas uma fenda, procurou-se relacionar a abertura de fendas (w) do diagrama da Figura 6.4 com o valor de S_{rm} , possibilitando a caracterização do comportamento total do betão em tração através de um único diagrama Tensão vs Extensão (ver Figura 6.5).

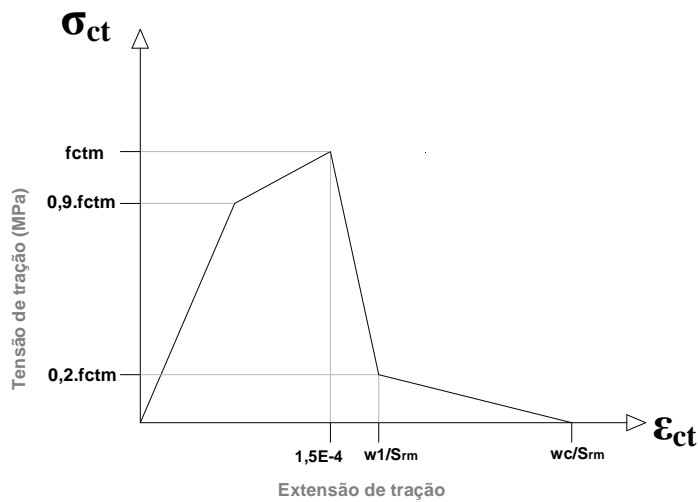


Figura 6.5: Modelo do betão à tração proposto pelo MC 2010 [73] utilizado na modelação numérica

Este diagrama considera que a abertura de uma fenda discreta num comprimento S_{rm} é distribuída ao longo desse comprimento. A formulação da relação tensão vs extensão fica assim dependente de

um comprimento (S_{rm}) que deverá ser calculado de modo a manter-se a mesma energia libertada durante a formação da fenda. A determinação de S_{rm} baseia-se na expressão proposta pela FIB, bulletin 14 [20] e na qual o espaçamento médio entre fendas é calculado de acordo com a expressão:

$$S_{rm} = \frac{2f_{ctm} \times A_{c,eff}}{\tau_{sm}u_s} \times \frac{E_s A_s}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} \quad (6.15)$$

onde, ξ_b é um parâmetro de aderência dado por:

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} \times E_s A_s u_f}{\tau_{sm} \times E_f A_f u_s} \quad (6.16)$$

e,

$A_{c,eff}$ é a área efetiva do betão traccionado, u_f e u_s são os perímetros de aderência do FRP e das armaduras e τ_{sm} e τ_{fm} são parâmetro relacionados com a tensão de tração no betão e iguais a $1,8f_{ctm}$ e $1,25f_{ctm}$, respectivamente.

A modelação do comportamento do betão em tração foi ainda realizada com base no modelo proposto por Popovics (Figura 6.6) [74].

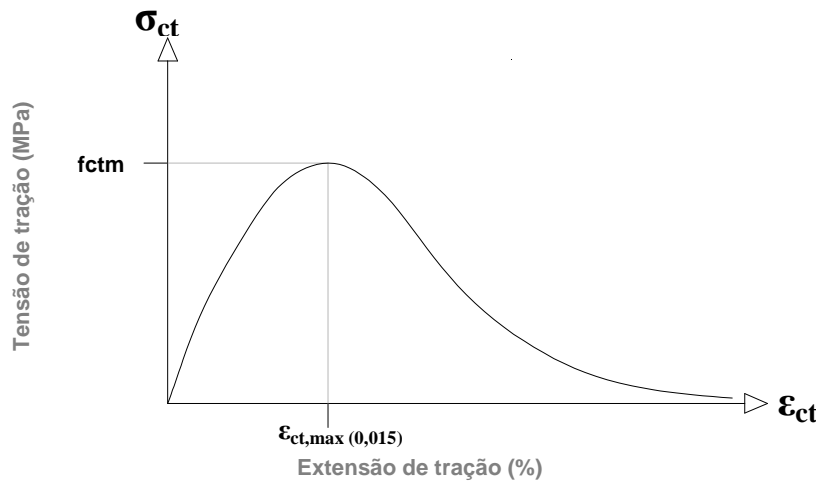


Figura 6.6: Modelo do betão à tração proposto por Popovics [74]

Este modelo tem a vantagem de definir o comportamento à tração do betão em termos de extensões apenas através da seguinte expressão:

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \times \frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{ct,max}} \times \frac{n_p}{(n_p - 1) + \left(\frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{ct,max}}\right)^{n_p}} \quad (6.17)$$

onde,

σ_{ct} é o valor da tensão de tração no betão, n_p é um coeficiente ajustável de forma a ajustar a energia de fractura do betão, $\varepsilon_{ct,max}$ é a extensão correspondente ao valor máximo da tensão de rotura do betão (f_{ctm}) e ε_{ct} é a extensão no betão em tração.

A função de Popovics foi aproximada ao modelo proposto pelo *Model Code 2010* [73] através do coeficiente n_p por forma a que a energia de fractura do betão (G_f) fosse igual em ambos os modelos. Deste modo, n_p foi calculado a partir da energia de fractura e de S_{rm} de acordo com:

$$\frac{G_f}{S_{rm}} = \int_{\varepsilon_{ct,max}}^{+\infty} \sigma_{ct} \cdot d\varepsilon_{ct} = \int_{\varepsilon_{ct,max}}^{+\infty} \left(f_{ctm} \times \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct,max}} \times \frac{n_p}{(n_p - 1) + \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct,max}} \right)^{n_p}} \right) \cdot d\varepsilon_{ct} \quad (6.18)$$

Aproximando a energia de fractura à expressão proposta pelo *Model Code 2010* [73] (Eq.6.14), a Eq.6.18 foi resolvida numericamente. Para esse efeito, o coeficiente n_p foi determinado de modo a que o seu valor minimizasse o erro obtido pela equação seguinte (Método dos Mínimos Quadrados):

$$\min \sum_{i=1}^N (\sigma_{ct,MC2010} - \sigma_{ct,Popovics})^2 \quad (6.19)$$

6.2.3 Material compósito de CFRP

O comportamento dos compósitos de FRP não apresenta patamar de cedência nem plastificação próximo da rotura, exibindo um comportamento típico elástico e linear ao longo do seu desempenho. Na Figura 6.7 mostram-se exemplos de diagramas tensão-deformação atribuídos a diferentes tipos de compósitos FRP.

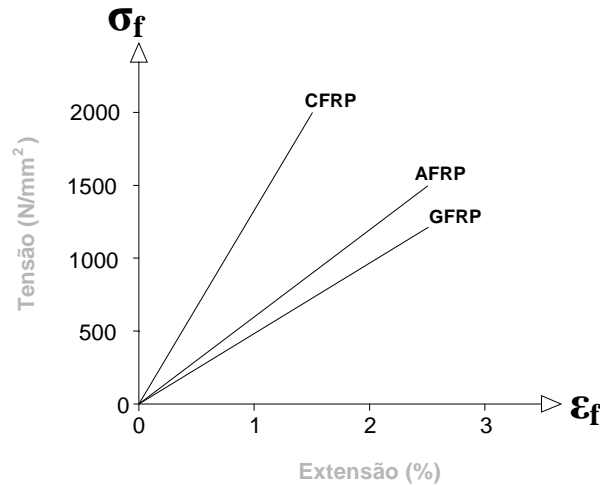


Figura 6.7: Exemplos de diagramas tensão-deformação típicos para CFRP, GFRP e AFRP [adaptado 73]

Tendo em consideração o tipo de comportamento do compósito de CFRP utilizado, é necessário proceder à sua modelação através de uma função de primeiro grau. Como tal, recorreu-se à Lei de Hooke (Eq.6.20) destinada à caracterização dos materiais com comportamento deste género.

$$\sigma_f = E_f \times \varepsilon_f \quad (6.20)$$

onde,

σ_f , E_f e ε_f são respectivamente a tensão, o módulo de elasticidade e a extensão do FRP.

6.3 Critérios de rotura

Antes de se proceder à determinação dos valores numéricos através da modelação desenvolvida para o efeito, é importante definir o critério para o qual ocorre a rotura dos sistemas. No caso presente, tendo conhecimento do modo de rotura característico do elemento em estudo, optou-se por utilizar como critério de rotura a limitação da extensão do material condicionante.

Apenas para a técnica EBR existem hoje recomendações nas principais publicações (ACI e FIB) acerca do coeficiente de limitação da extensão no FRP, tendo em conta as roturas prematuras que frequentemente ocorrem neste sistema de reforço. O ACI (committee 440) [51] sugere um critério de cálculo no qual se limita a extensão no FRP através da adopção de um coeficiente k_m dependente da espessura (t_f), módulo de elasticidade (E_f) e número de camadas do compósito (n). Já o documento da FIB (*bulletin 14*) [20], impõe um conjunto de verificações mais complexas para controlo das roturas prematuras nomeadamente, a verificação da zona de ancoragem e limitação da extensão no FRP, o cálculo da envolvente das tensões de tração e a verificação da ancoragem e da

transferência das tensões entre o laminado e o elemento de betão. De acordo com Rostasy [75], a extensão do FRP aplicado à técnica EBR pode ser limitada ao mínimo de entre $5 \times \varepsilon_y$ e $0,5 \times \varepsilon_{fu}$.

Sendo as anteriores recomendações de carácter semi-empírico é também possível definir critérios de rotura com base em dados empíricos. Estes, pela inexistência de recomendações para a limitação da extensão de rotura, podem ser baseados na comparação dos dados obtidos em ensaios de outros autores realizados a sistemas com o mesmo tipo de reforço.

Para modelar numericamente todas as vigas estudadas foram adoptados os critérios de rotura “clássicos” (limitação da rotura pelo betão (esmagamento) ou das armaduras longitudinais - $f_c \leq f_{cm}$ e $f_s \leq f_{tm}$). Para as vigas reforçadas com as técnicas EBR (V2 e V3), NSMR (V4 e V5), EBRA (V6, V7 e V8) e HNSMR (V9 e V10) adoptaram-se também os critérios de limitação da extensão no CFRP que de seguida são descritos:

- i. Para as vigas reforçadas com a técnica EBR (V2 e V3) foram adoptadas as recomendações do ACI (committee 440) [51], cuja extensão limite a atribuir ao CFRP no modelo numérico é determinada com base na Eq.6.21

$$\varepsilon_{f,limite} \leq K_m \times \varepsilon_{fu} \quad (6.21)$$

com,

$$K_m = \begin{cases} 1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{428000} & \text{para } n \cdot E_f \cdot t_f \leq 214000 \\ \frac{10700}{n \cdot E_f \cdot t_f} & \text{para } n \cdot E_f \cdot t_f \geq 214000 \end{cases} \quad (6.22)$$

- ii. Para as vigas reforçadas com a técnica NSMR (V4 e V5) foram analisados dados relativos a ensaios levados a cabo por outros autores, possibilitando a obtenção de um critério de rotura por via empírica. Com os dados recolhidos determinou-se uma curva de tendência, correlacionando a percentagem de armadura equivalente (ρ_{eq} – Eq.6.23) com o coeficiente de utilização do CFRP (β) verificado nos laminados no instante da rotura.

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \times \frac{E_f}{E_s}}{A_c} \quad (6.23)$$

Onde,

A_c é a área da secção transversal de betão e A_s , A_f , E_s e E_f são respectivamente, as áreas e os módulos de elasticidade do aço e do FRP.

A adopção deste critério ficou assim a dever-se ao facto de ser possível obter uma percentagem de utilização do CFRP (relativamente ao seu valor último) a partir de um parâmetro que relacione, ao mesmo tempo, a quantidade utilizada de armadura de aço e CFRP com a respectiva geometria do modelo em causa.

Na Tabela 6.1 estão presentes os dados relativos à análise realizada aos ensaios levados a cabo por outros autores em sistemas NSMR, cujos modos de rotura se verificaram por delaminação ou destacamento do CFRP. Para a referida análise foram utilizados os trabalhos de Fortes et al. [76], Castro et al. [77], Hassan e Rizkalla [78], Barros e Dias [79] e Carvalho [3]. A Figura 6.8 representa o diagrama obtido através da relação Grau de utilização (β_u) vs Percentagem de armadura equivalente (ρ_{eq}).

Autor	Modelo	A_s (mm ²)	A_f (mm ²)	A_c (mm ²)	ρ_{eq} (%)	β_u
Fortes et al. [76]	V1R1	56,5	13,9	17000	0,40	0,91
	V1R2	84,8	27,8	17700	0,60	0,75
	V1R3	106,8	27,8	17500	0,74	0,75
	V1R4	150,8	41,7	18000	1,02	0,62
Castro et al. [77]	B1	628,3	96	100000	0,69	0,68
	B2	628,3	96	100000	0,69	0,75
Hassan e Rizkalla [78]	B4	200,6	30	52500	0,43	0,91
	B5	200,6	30	52500	0,43	0,98
	B6	200,6	30	52500	0,43	0,99
	B7	200,6	30	52500	0,43	0,99
	B8	200,6	30	52500	0,43	1,01
Barros e Dias [79]	S1M	157	14	45000	0,38	0,99
	S2M	157	28	45000	0,40	0,97
	S3M	157	42	45000	0,43	0,83
Carvalho [3]	TSC4	339,3	56	65000	0,59	0,93

Tabela 6.1: Dados relativos à análise do critério de rotura para sistemas NSMR

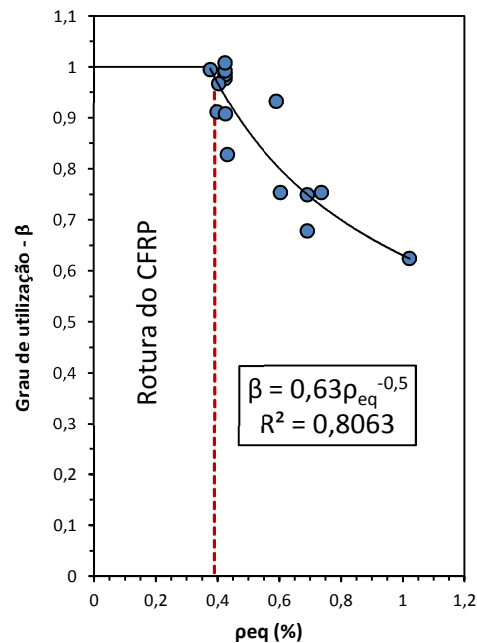


Figura 6.8: Relação percentagem de armadura equivalente vs grau de utilização do CFRP

Tendo em conta a função obtida através da linha de tendência representada no diagrama da Figura 6.8, é possível concluir que o valor da extensão dos laminados de carbono para os quais é esperada a ocorrência de destacamento ou delaminação deste material é dado pela Eq. 6.24.

$$\varepsilon_{f,r} = \frac{0,63 \times \varepsilon_{f,u}}{\sqrt{\rho_{eq}}} \quad (6.24)$$

- iii. No caso das técnicas EBRA e HNSMR desenvolvidos no âmbito deste trabalho, e tendo em consideração os modos de rotura obtidos, optou-se por limitar a extensão do compósito de CFRP ao valor médio da extensão última deste material ($\varepsilon_{fm} = 1,03 \%$).

6.4 Programa de cálculo e modelo numérico

Para modelar numericamente o comportamento das vigas em estudo, confrontando assim valores numéricos com valores experimentais, foi elaborado um programa de cálculo a partir do software *MATLAB*. A realização deste programa teve como objectivo a construção de uma ferramenta de cálculo que, com base na geometria do elemento estrutural e das características dos seus materiais, permitisse calcular momentos flectores, curvatura (Eq.6.25), forças, deslocamentos verticais, bem como o estado de tensão e deformação dos materiais e da secção transversal analisada.

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{c_{sup}}}{X_i} \quad (6.25)$$

onde, $\varepsilon_{c_{sup}}$ e X_i são a extensão na fibra de betão mais comprimida e a linha neutra

Na presente modelação, admitiu-se que as secções se mantêm planas após a deformação e que as extensões se desenvolvem linearmente ao longo da secção transversal do modelo. Desta forma, para uma determinada curvatura na secção (φ) e uma determinada deformação axial (ε_0), a deformação em qualquer um dos elementos que dividem a secção do modelo é obtida através da seguinte equação de compatibilidade [30]:

$$\varepsilon^i = \varepsilon_0 + \varphi \times y^i \quad (6.26)$$

Através das respectivas leis constitutivas dos materiais e, uma vez obtido o campo de deformações da secção, torna-se então possível determinar as correspondentes tensões nos elementos constituintes, bem como o respectivo equilíbrio da mesma (Eq.6.27 e 6.28).

$$N = \sum_{i=1}^{nc} f_c^i \cdot A_c^i + \sum_{i=1}^{ns} f_s^i \cdot A_s^i + \sum_{i=1}^{nf} f_f^i \cdot A_f^i \quad (6.27)$$

$$M = \sum_{i=1}^{nc} f_c^i \cdot A_c^i \cdot y_c^i + \sum_{i=1}^{ns} f_s^i \cdot A_s^i \cdot y_s^i + \sum_{i=1}^{nf} f_f^i \cdot A_f^i \cdot y_f^i \quad (6.28)$$

El-Mihilmy e Tedesco [80], sugerem que após a cedência das armaduras as curvaturas podem ser determinadas através da interpolação linear entre a curvatura correspondente à cedência das

armaduras (φ_y) e à rotura do sistema (φ_r). Desta forma, o valor máximo da curvatura que se verifica ao longo do comprimento das rótulas plásticas (obtido segundo o modelo de Sawyer pela Eq.6.29 [30]) é determinado ao longo do regime de pós-cedência, com base na Eq.6.30.

$$L_p = 0,25h + 0,075L \quad (6.29)$$

$$\varphi = \varphi_y + \frac{\frac{M}{M_y} - 1}{\frac{M_r}{M_y} - 1} \times (\varphi_r - \varphi_y) \quad (6.30)$$

onde, h e L são a altura da secção transversal e o comprimento da viga e M , M_y e M_r são respectivamente, os momentos flectores atuante, de cedência e rotura.

com,

$$M_y = \frac{f_{ym} \times I_{cr}}{\frac{E_s}{E_c} \times (d - X_i)} \quad (6.31)$$

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_{sy}}{d - X_i} \quad \text{e} \quad \varphi_r = \frac{\varepsilon_{c1}}{X_i} \quad (6.32)$$

$$I_{cr} = \frac{b \cdot X_i^3}{3} + \frac{E_s}{E_c} \times A_s \times (d - X_i)^2 + \frac{E_f}{E_c} \times A_f \times (d_f - X_i)^2 \quad (6.33)$$

onde, I_{cr} é o momento de inércia da secção fendilhada, f_{ym} e ε_{sy} são respectivamente, a tensão e extensão de cedência das armaduras, d é a altura útil e b a largura da secção da viga.

Tendo em conta que a curvatura é directamente proporcional ao momento flector e inversamente proporcional à rigidez de flexão da viga ($\varphi = \frac{M}{EI}$), o programa utiliza o princípio dos trabalhos virtuais (Eq.6.34) com o objectivo de determinar o respectivo deslocamento vertical a meio vão (δ_v) para o momento flector correspondente.

$$\delta_v = \int_0^L \frac{M \bar{M}}{EI} \cdot dx = \int_0^L \varphi \cdot \bar{M} \cdot dx \quad (6.34)$$

onde, \bar{M} é o momento flector para a carga unitária aplicada a meio vão da viga.

De acordo com o esquema da Figura 6.9, o programa de cálculo realizado pode ser estruturado segundo quatro módulos principais:

- i. MÓDULO I: Introdução das variáveis;
- ii. MÓDULO II: Leis constitutivas dos materiais;
- iii. MÓDULO III: Cálculo;
- iv. MÓDULO IV: Resultados

- **MÓDULO I:**

O MÓDULO I corresponde à primeira parte do programa. É nesta secção que o utilizador pode definir todos os dados relativos às propriedades e geometria dos materiais constituintes da viga e características geométricas da mesma. Para além disto, o utilizador terá que fornecer ao programa todos os dados referentes à limitação da extensão no CFRP definidos com base nos critérios de rotura estabelecidos previamente. Através de algumas variáveis definidas pelo utilizador, é também neste módulo que o programa constrói automaticamente a dimensão das matrizes onde serão colocados os valores à medida que o cálculo é realizado. Refira-se que na definição das propriedades do betão, o utilizador pode optar por um dos dois modelos de tração do betão mencionados anteriormente e adaptados de MC2010 [73] ou de Popovics [74]. Para auxiliar o utilizador na definição do coeficiente n_p , caso este opte pelo modelo proposto por Popovics [74], construiu-se um ábaco (Apêndice B) que, para diferentes classes de resistência do betão, relaciona o referido coeficiente com o espaçamento médio entre fendas (S_{rm}). Este ábaco consiste num conjunto de linhas de tendência (polinomiais) formadas a partir de diversos pontos, obtidos com base na simulação de diferentes modelos. Estes modelos foram desenvolvidos variando diversos parâmetros na secção transversal, nomeadamente o perímetro de aderência das armaduras e do CFRP (u_s e u_f), obtendo-se desta forma diferentes valores de S_{rm} , aos quais está associado um coeficiente n_p .

- **MÓDULO II:**

No MÓDULO II o programa define a configuração total dos diagramas de comportamento dos materiais com base nas leis constitutivas dos materiais referidos em 6.2.

- **MÓDULO III:**

O MÓDULO III corresponde à parte do programa onde, de uma forma iterativa, são realizados os cálculos necessários para a obtenção dos resultados pretendidos. Neste módulo o programa começa

por construir os vectores referentes à divisão da secção em filamentos e de seguida realiza incrementos de extensão no material de reforço, cuja gama de valores está compreendida entre 0 e o respectivo valor limite atribuído pelo utilizador no MÓDULO I. Para cada extensão no FRP incrementada, o cálculo inicia-se pela determinação do vector correspondente ao campo de extensões na secção transversal, bem como das extensões isoladas ao nível das armaduras longitudinais e fibras inferior e superior do betão. Após estas operações cada valor de extensão calculado é convertido para tensão através das expressões que definem as respectivas leis constitutivas dos materiais. Por fim, as tensões calculadas são convertidas para forças e com estas é verificado o respectivo equilíbrio na secção transversal. Para cada valor de extensão no FRP atribuído inicialmente, a linha neutra é alterada até que o equilíbrio de forças seja satisfeito. Quando o equilíbrio de forças na secção transversal é verificado, todos os resultados obtidos neste último ciclo são armazenados nos respectivos elementos das matrizes definidas no MÓDULO I, e desta forma o programa encontra-se em condições de repetir o mesmo processo para o incremento seguinte de extensão no FRP. Assim que for atingido o valor limite de extensão no FRP, ou antes deste, se for atingida a resistência última de qualquer outro material constituinte do modelo, o programa sai do ciclo iterativo e continua o seu percurso no módulo seguinte. Neste módulo, ao longo de cada ciclo, são também calculados os respectivos momentos flectores, curvaturas e deslocamentos verticais na viga em estudo.

- **MÓDULO IV:**

No MÓDULO IV o programa reúne todas as matrizes onde os valores calculados foram armazenados e com estas constrói os respectivos diagramas, possibilitando a sua comparação com os mesmos gráficos obtidos experimentalmente. Refira-se que a apresentação dos diagramas (ver Figura 6.9 no bloco correspondente ao “Módulo IV: Resultados”) está dependente da respectiva ativação no MÓDULO I do programa.

No que diz respeito ao modelo representativo do problema em estudo, considerou-se uma viga em betão armado, de secção transversal em T e reforçada com materiais compósitos de CFRP. A secção transversal da viga foi dividida em filamentos rectangulares com 1 milímetro de altura e largura variável consoante a sua localização na secção transversal (neste caso os filamentos do banzo tinham a largura do banzo e os filamentos da alma tinham a largura da alma). Para definir a localização tanto dos varões de aço como do FRP na secção transversal dos modelos numéricos, tomou-se como referência a localização dos respectivos centros de gravidade. Refira-se ainda que as interfaces entre os diversos materiais constituintes do modelo foram consideradas perfeitamente rígidas.

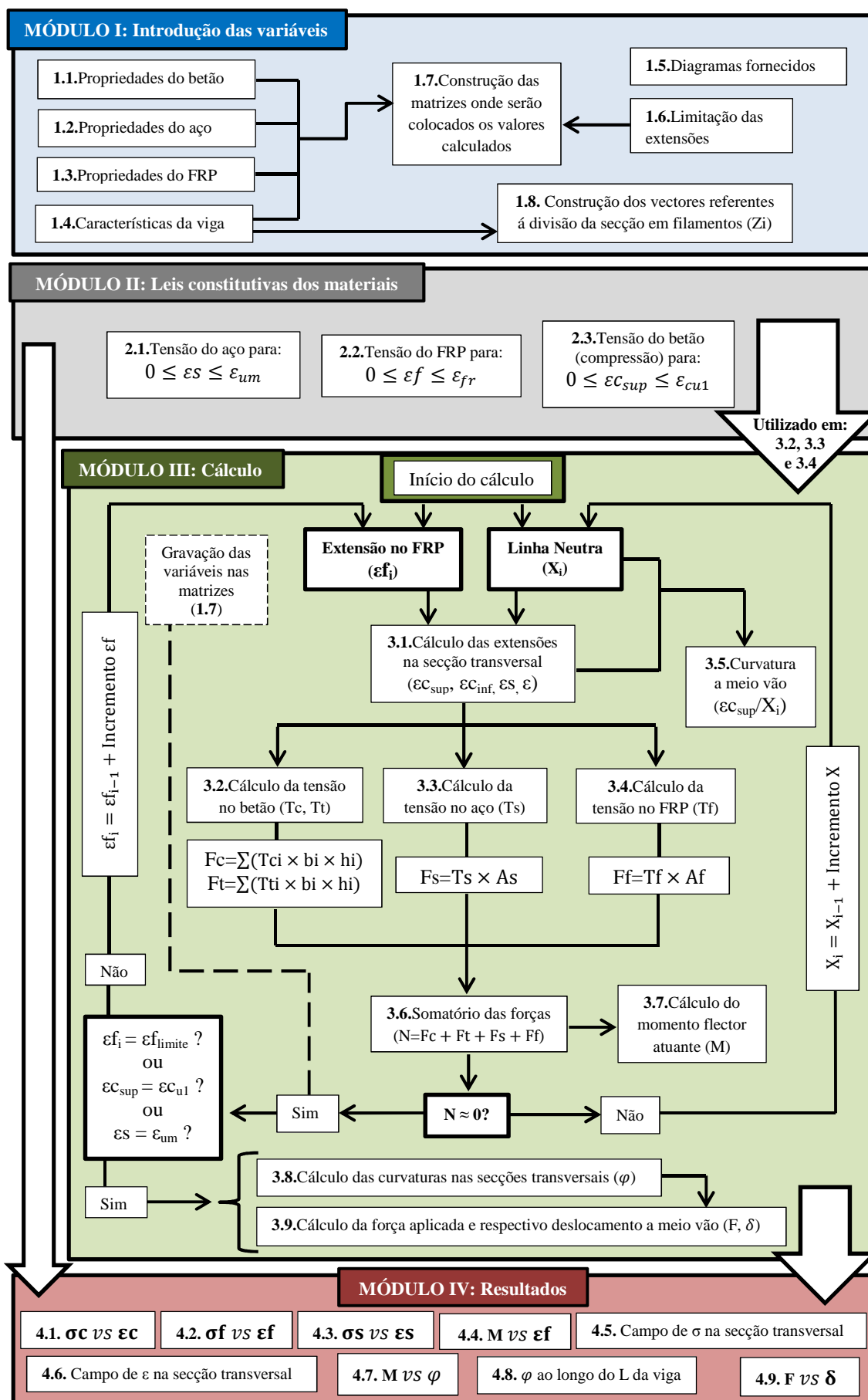


Figura 6.9: Fluxograma dos quatro módulos do programa de cálculo realizado

6.5 Apresentação dos resultados

Ao longo dos subcapítulos seguintes são apresentados os dados obtidos a partir dos modelos numéricos construídos no programa de cálculo realizado no âmbito deste trabalho. Visto que as vigas ensaiadas não apresentavam uniformidade, no que diz respeito tanto à sua geometria como à posição dos varões de aço, foi necessário ajustar em cada modelação as dimensões da viga e a posição das armaduras de acordo com as medições feitas aos cortes transversais das vigas ensaiadas. Para além disto, para as diferentes situações de reforço foi necessário alterar a posição do CFRP de acordo com cada técnica estudada. Desta forma, são apresentados em seguida para as vigas V1 a V10, o campo de tensões e extensões na secção transversal (na fendilhação, cedência e rotura) e as relações tensão-deformação do betão (em compressão e em tração), do CFRP e dos varões longitudinais de tração. Por forma a comparar os dados experimentais com os dados numéricos são ainda apresentados os diagramas Força vs Deslocamento e Momento vs Extensão no FRP de cada modelo. Atendendo a que os diagramas Força vs Deslocamento a meio vão e Momento vs Extensão no CFRP obtidos experimentalmente não consideram os pesos próprios, tanto do próprio elemento de betão armado como da estrutura metálica utilizada para a aplicação das cargas, optou-se por retirar essa contribuição nos dados obtidos numericamente. Para além destes diagramas são ainda apresentados os gráficos correspondentes aos momentos flectores ao longo das vigas em estudo, bem como as respectivas curvaturas obtidas numericamente.

- *Modelação da viga V1*

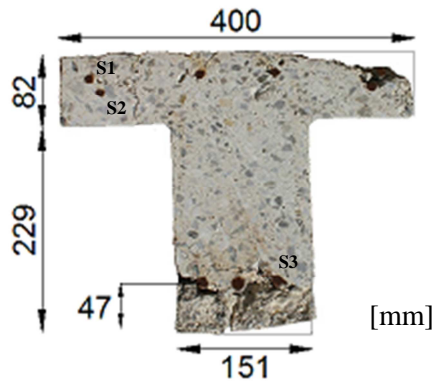


Figura 6.10: Secção transversal da viga V1

Dados	
<u>Betão:</u>	<u>Aço:</u>
$E_c = 24,53 \text{ GPa}$	$E_s = 200 \text{ GPa (S1, S2 e S3)}$
$f_{cm} = 20,44 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$
$f_{ctm} = 1,97 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$
$n_p = 2,51$	

Tabela 6.2: Dados inseridos no programa para o modelo V1

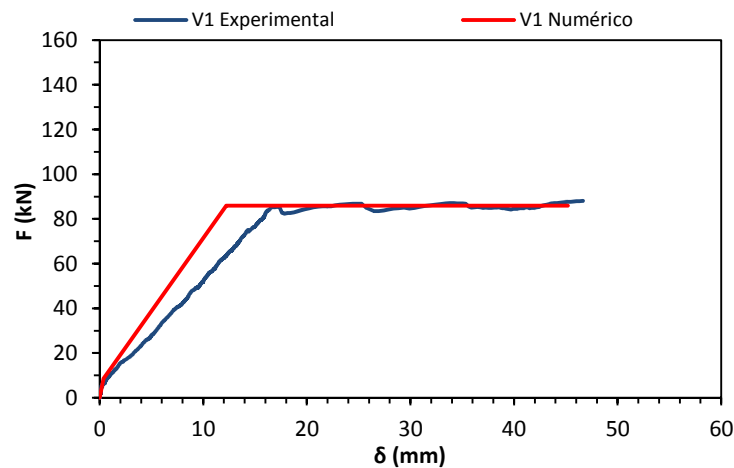


Figura 6.11: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V1 (dados numéricos e experimentais)

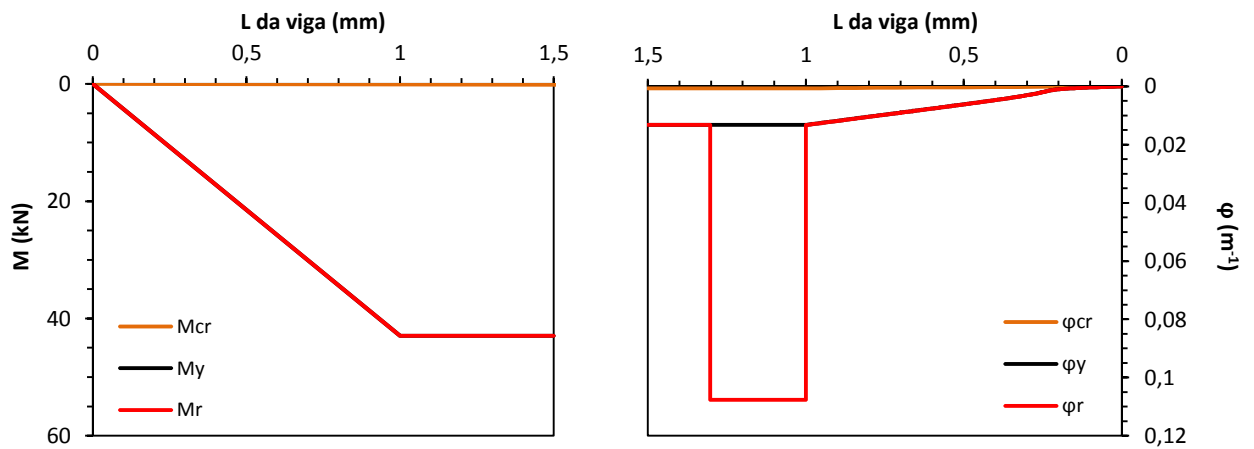


Figura 6.12: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V1

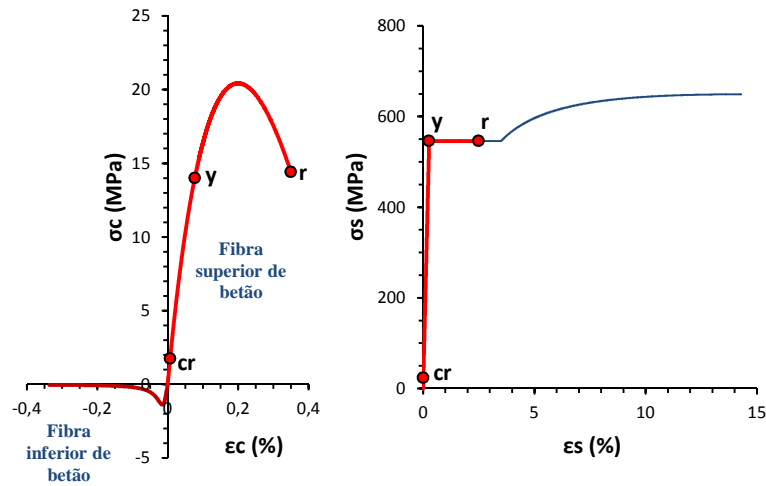


Figura 6.13: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V1

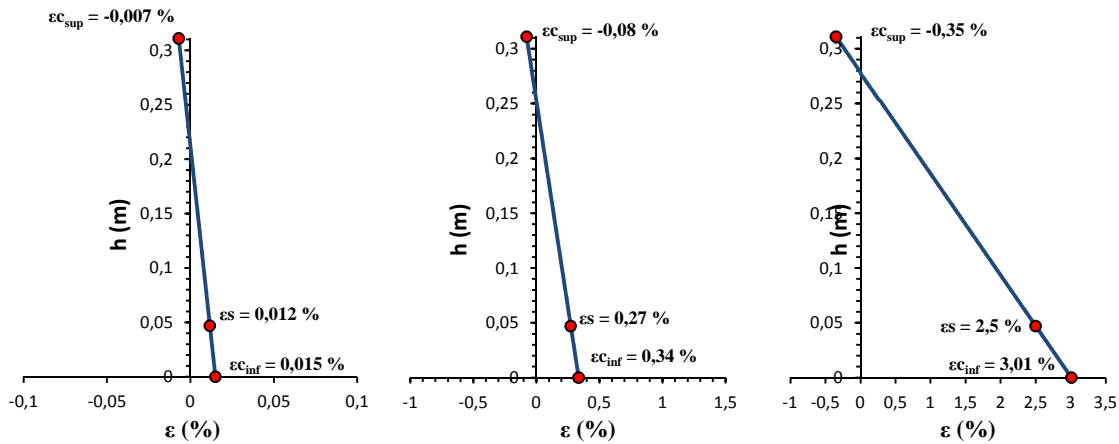


Figura 6.14: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V1

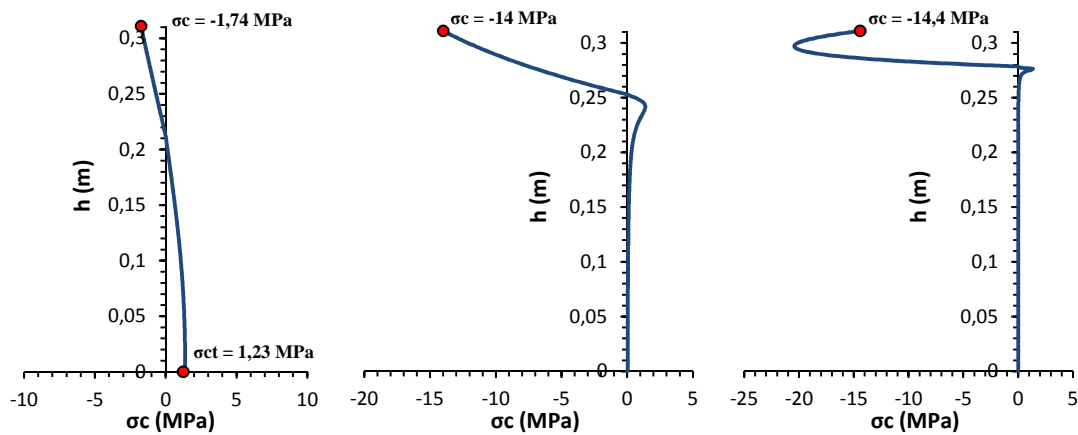


Figura 6.15: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V1

• *Modelação da viga V2*

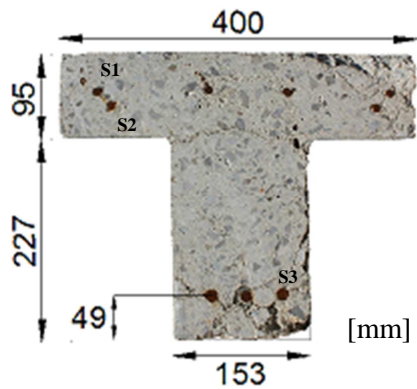


Figura 6.16: Secção transversal da viga V2

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 24,8 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 170 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 21,15 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,2 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,01 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 50 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,05 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 1 \text{ laminado}$
$n_p = 2,33$		$u_f = 50 \times 1 \text{ mm}$

Tabela 6.3: Dados inseridos no programa para o modelo V2

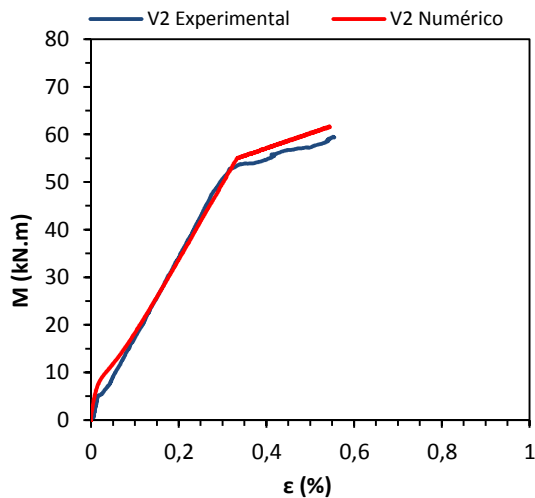


Figura 6.17: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V2 (dados numéricos e experimentais)

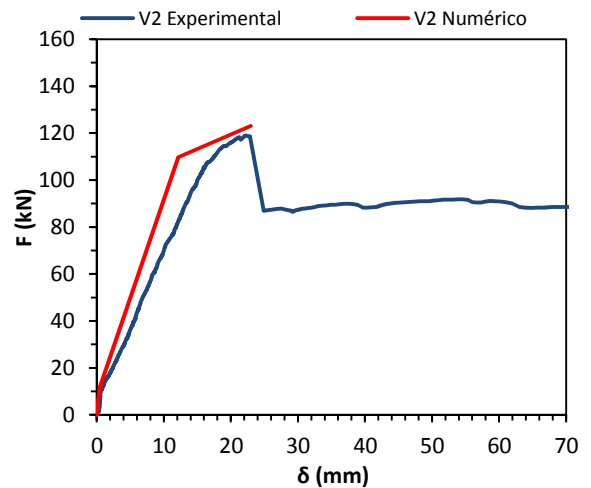


Figura 6.18: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V2 (dados numéricos e experimentais)

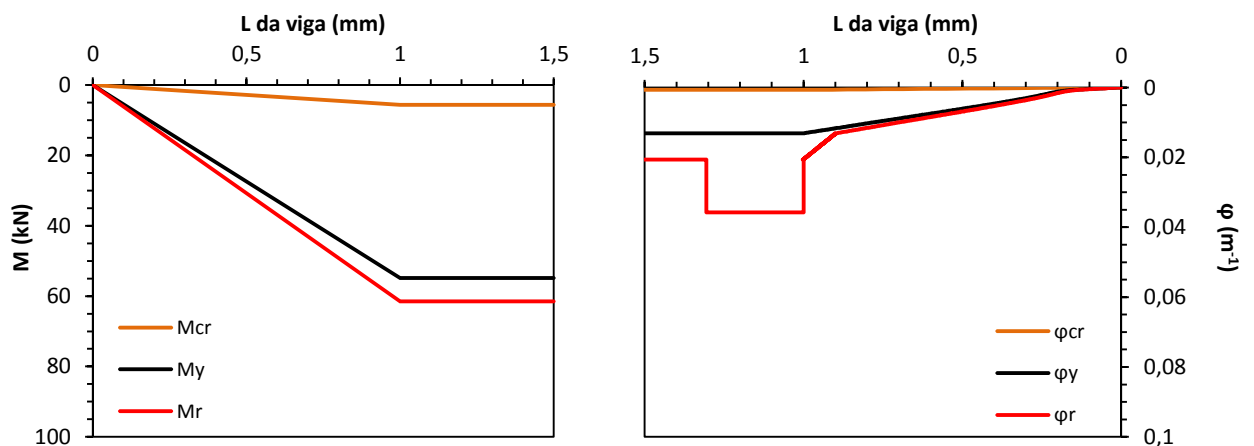


Figura 6.19: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V2

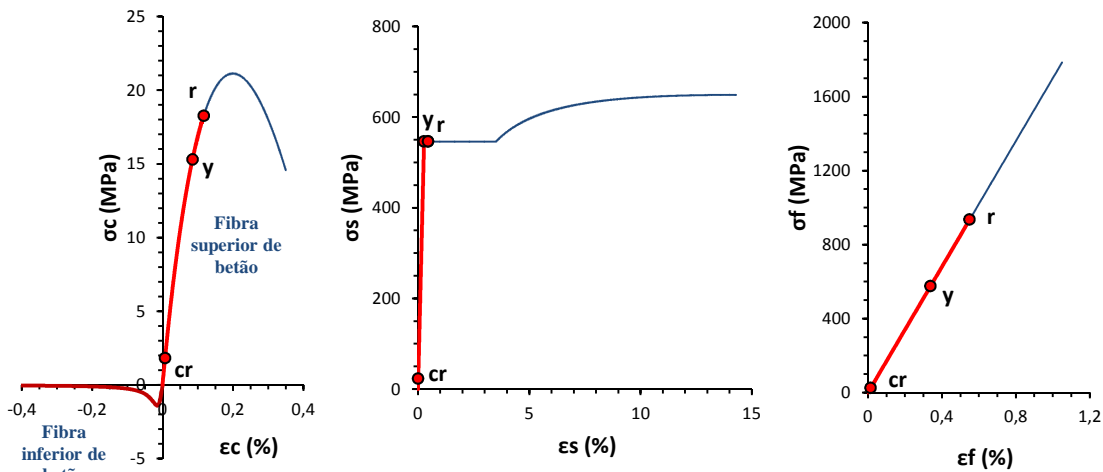


Figura 6.20: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V2

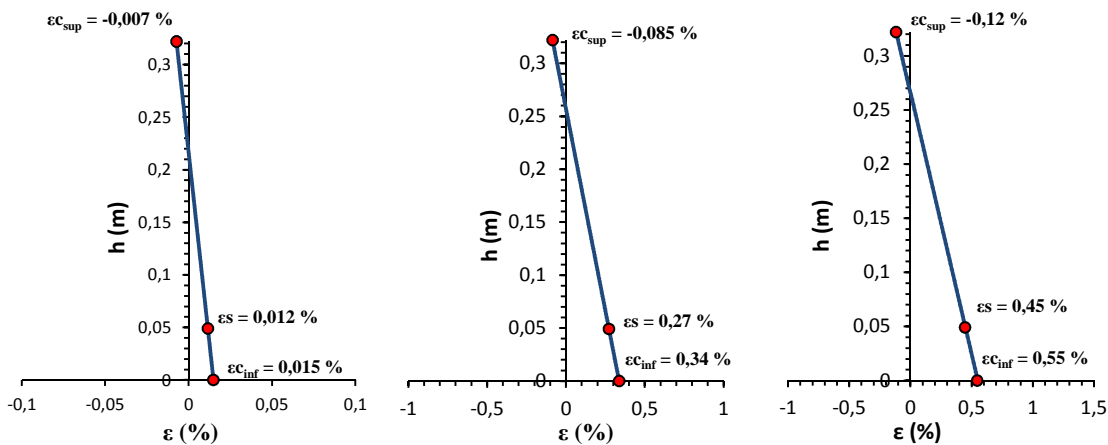


Figura 6.21: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V2

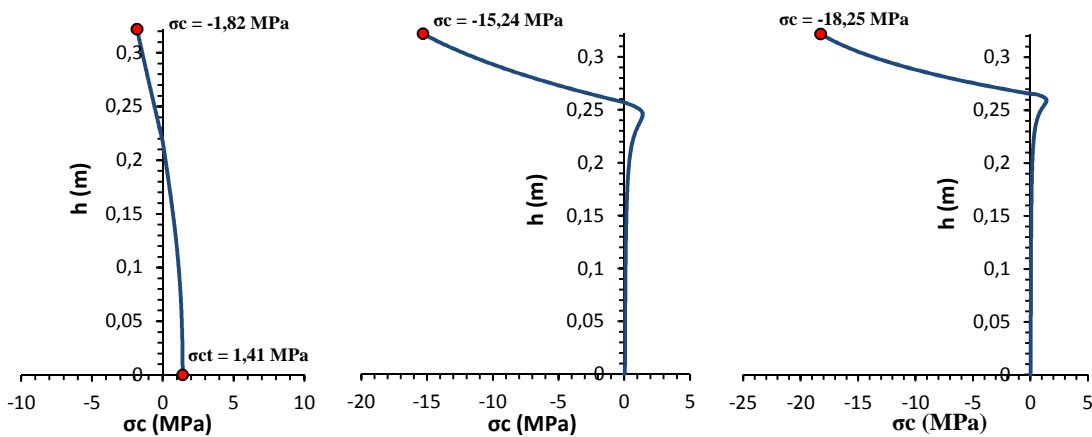


Figura 6.22: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V2

• *Modelação da viga V3*

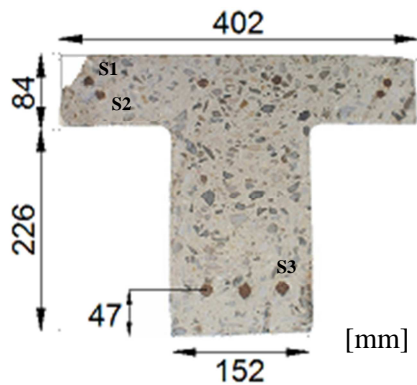


Figura 6.23: Secção transversal da viga V3

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 24,8 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 170 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 21,2 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,2 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,02 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 50 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,05 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 1 \text{ laminado}$
$n_p = 2,30$		$u_f = 50 \times 1 \text{ mm}$

Tabela 6.4: Dados inseridos no programa para o modelo V3

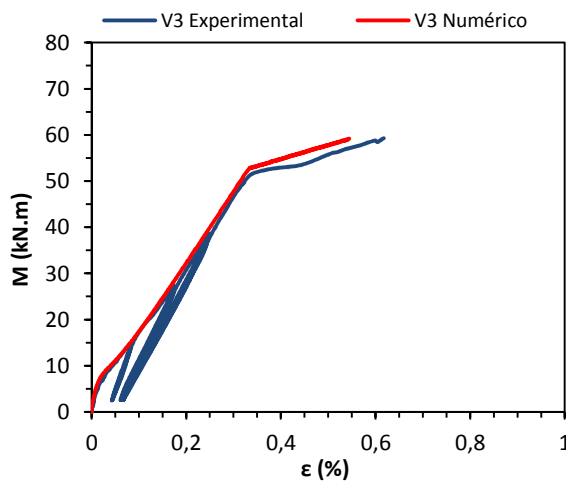


Figura 6.24: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V3 (dados numéricos e experimentais)

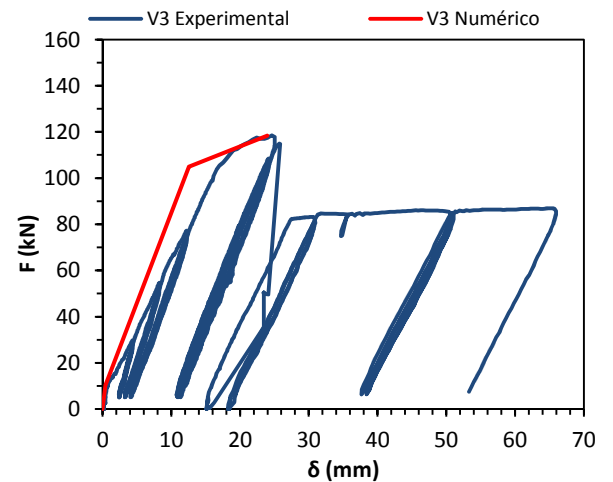


Figura 6.25: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V3 (dados numéricos e experimentais)

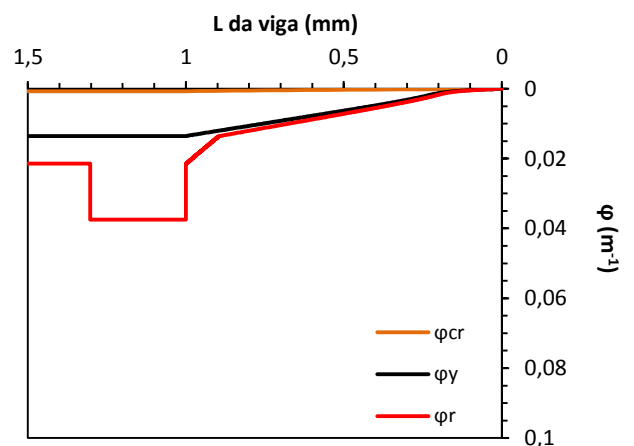
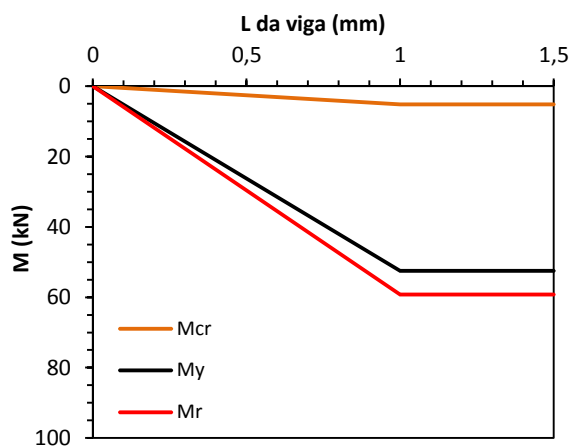


Figura 6.26: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V3

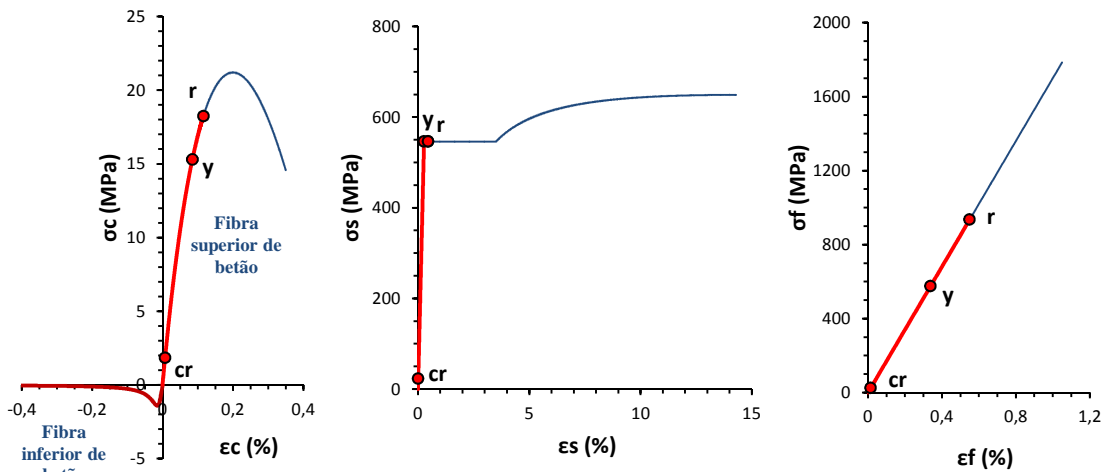


Figura 6.27: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V3

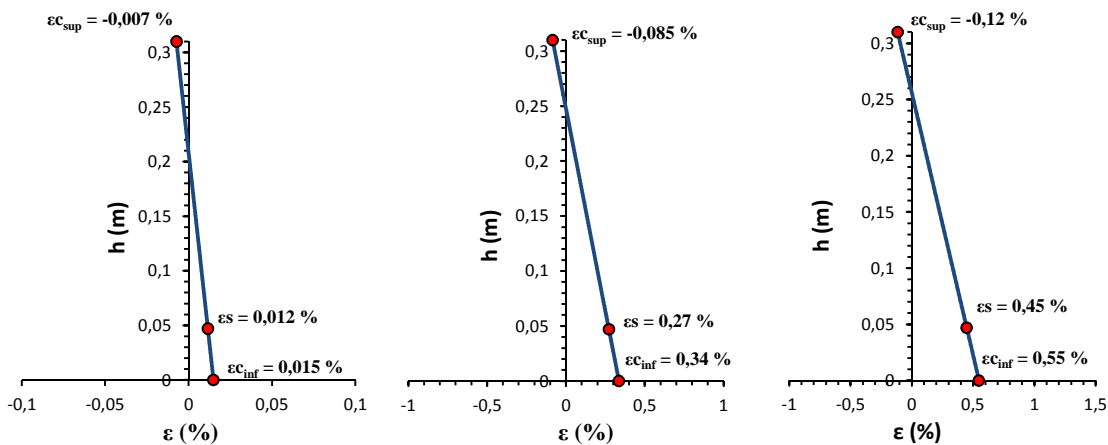


Figura 6.28: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V3

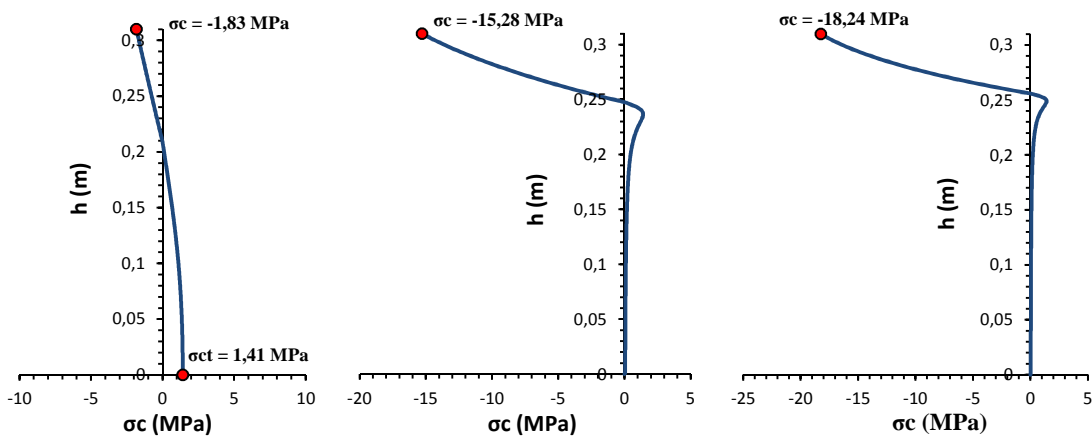


Figura 6.29: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V3

• *Modelação da viga V4*

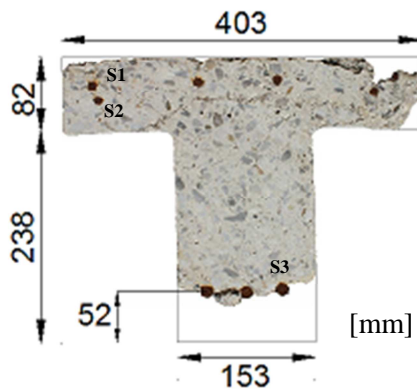


Figura 6.30: Secção transversal da viga V4

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 24,9 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 21,42 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,03 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,24$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.5: Dados inseridos no programa para o modelo V4

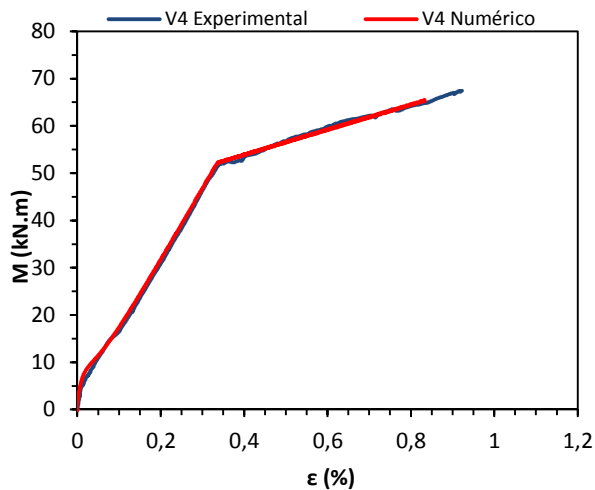


Figura 6.31: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V4 (dados numéricos e experimentais)

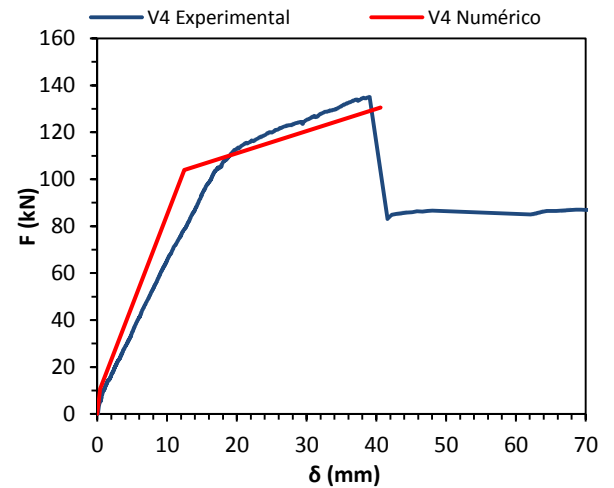


Figura 6.32: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V4 (dados numéricos e experimentais)

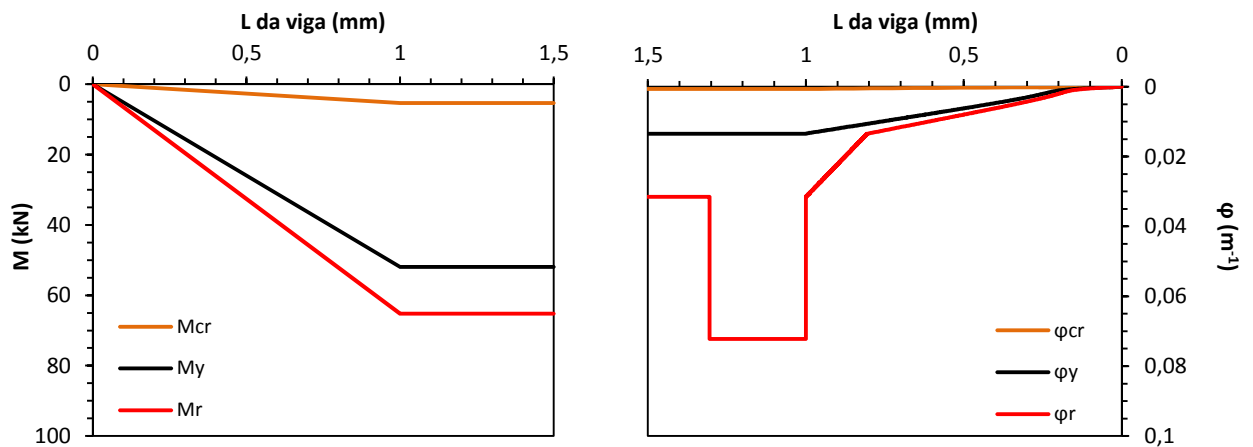


Figura 6.33: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V4

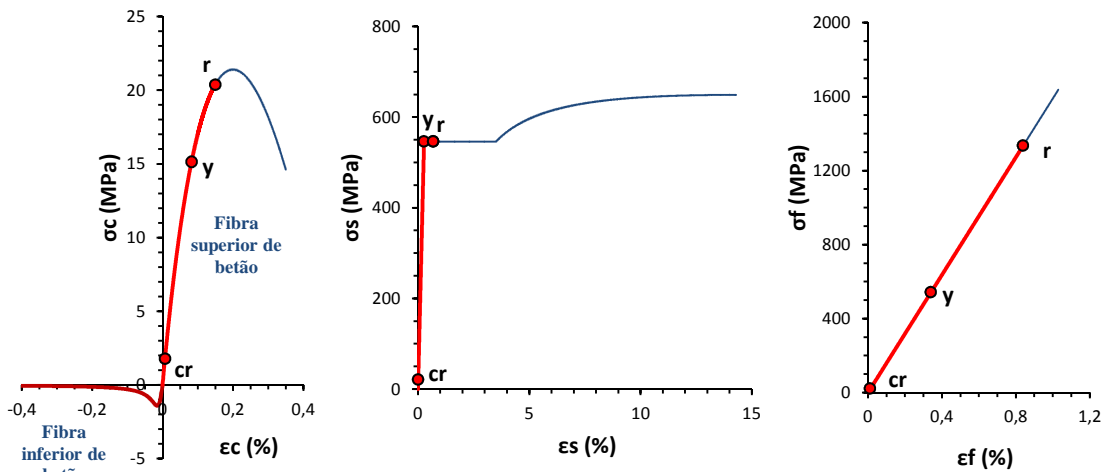


Figura 6.34: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V4

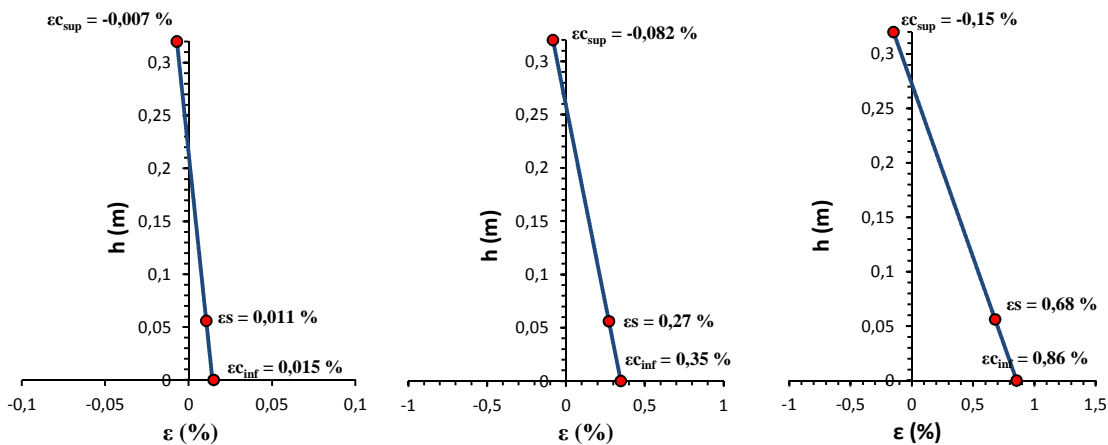


Figura 6.35: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V4

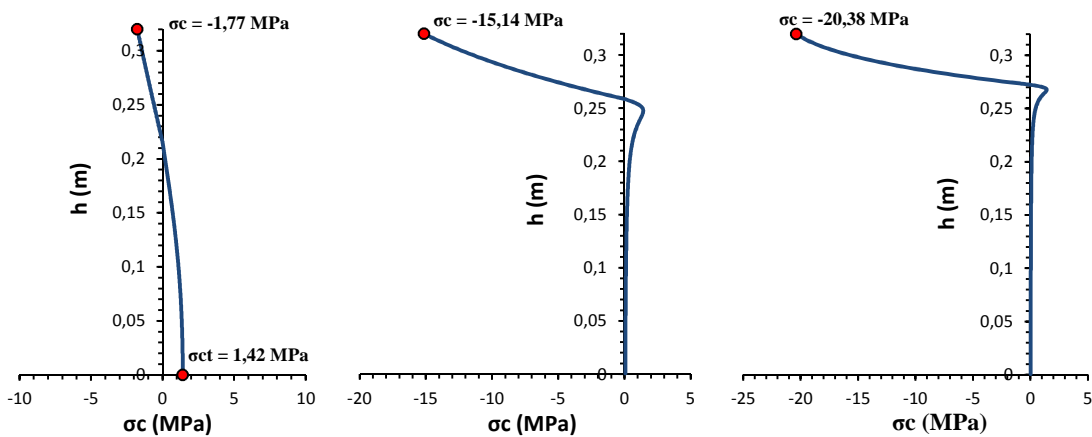


Figura 6.36: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V4

• *Modelação da viga V5*

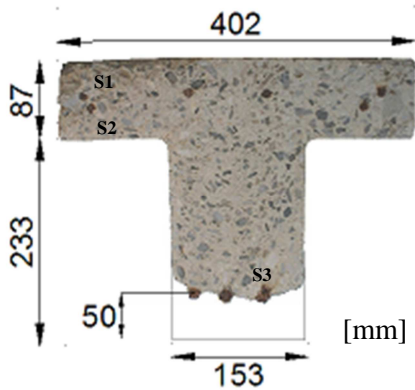


Figura 6.37: Secção transversal da viga V5

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 24,9 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 21,45 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,03 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,25$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.6: Dados inseridos no programa para o modelo V5

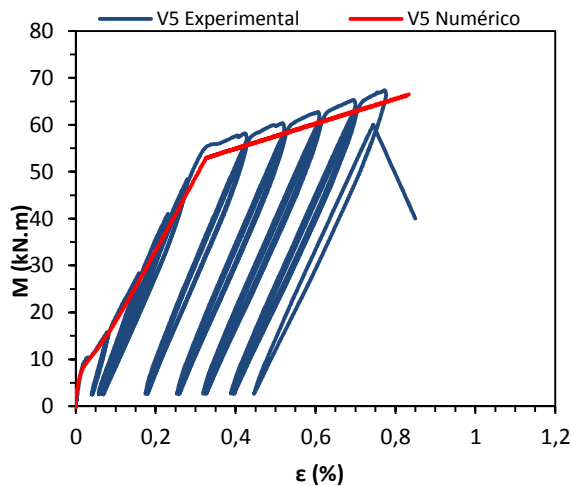


Figura 6.38: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V5 (dados numéricos e experimentais)

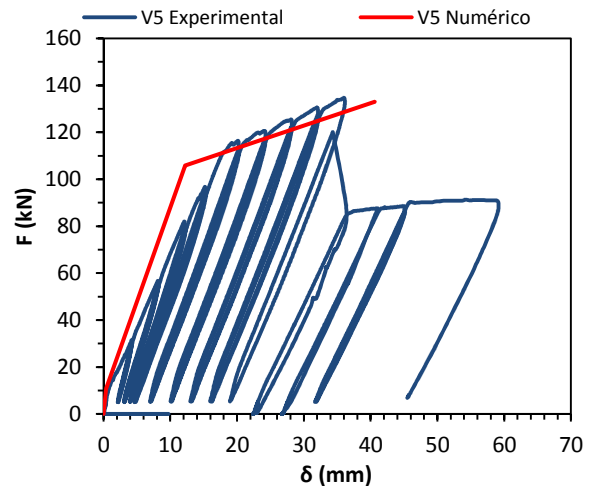


Figura 6.39: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V5 (dados numéricos e experimentais)

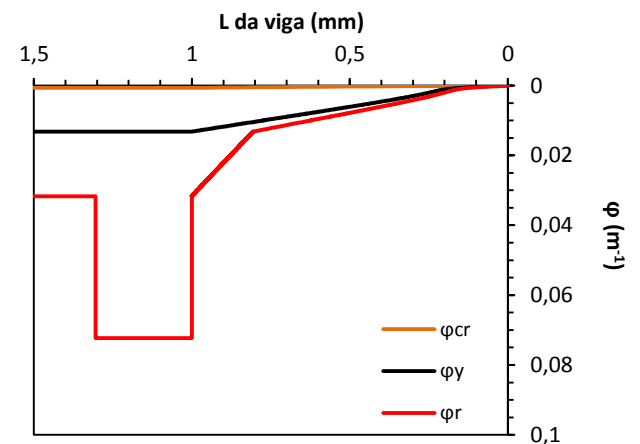
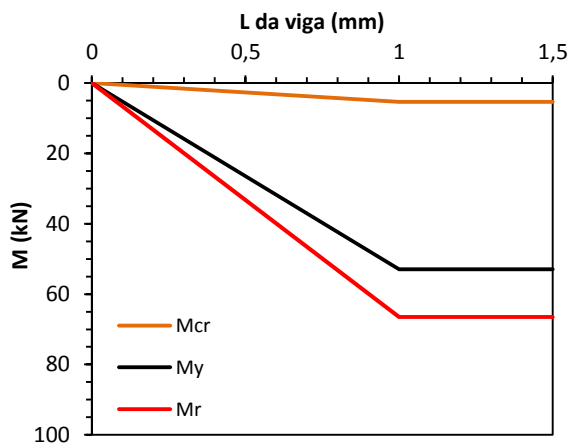


Figura 6.40: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V5

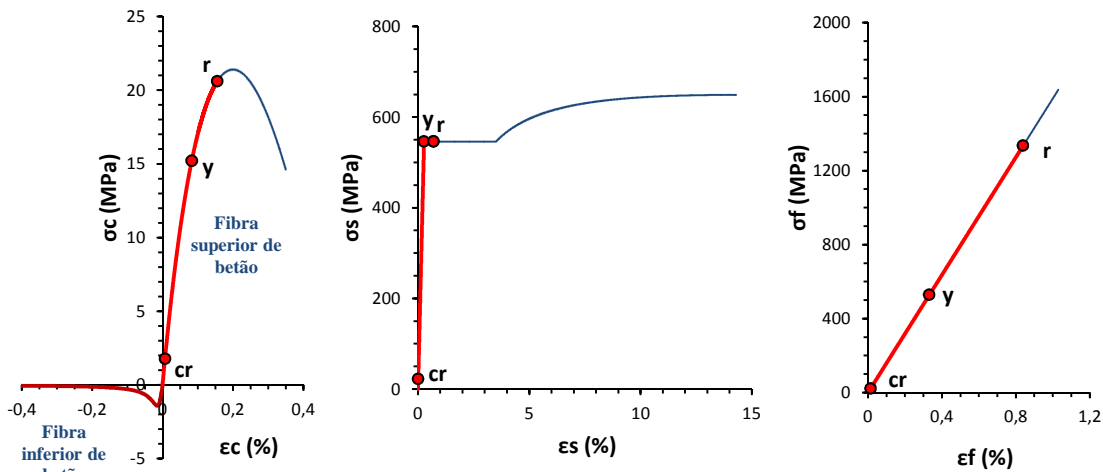


Figura 6.41: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V5

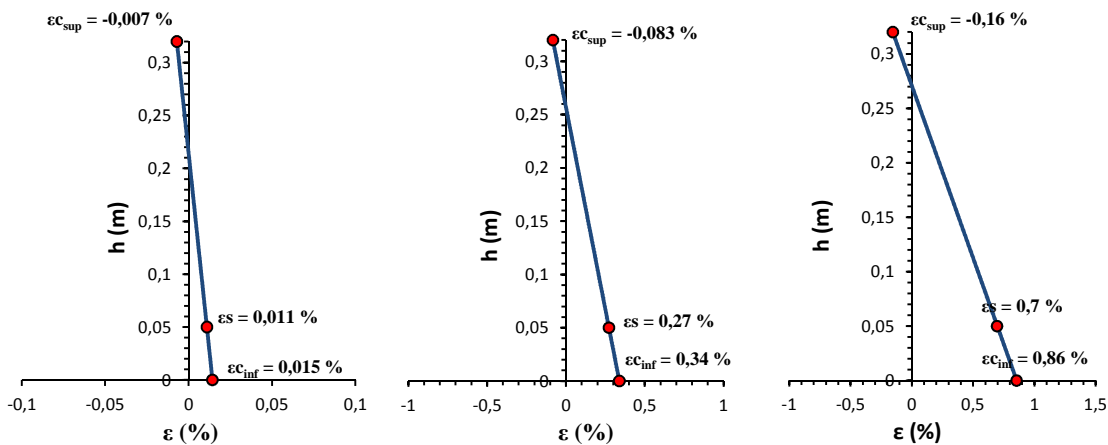


Figura 6.42: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V5

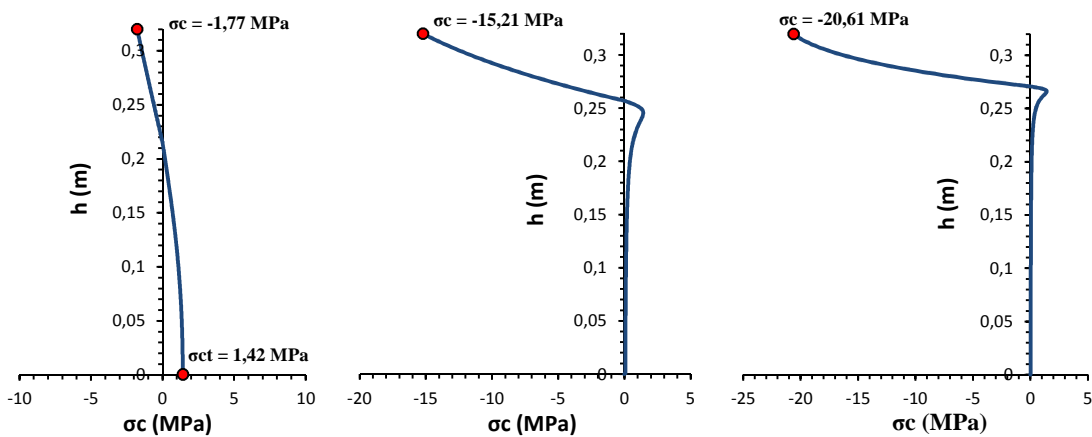


Figura 6.43: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V5

- Modelação da viga V6

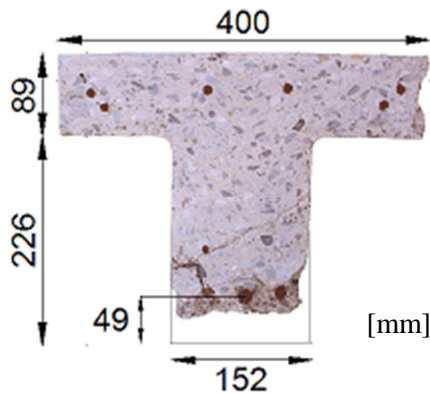


Figura 6.44: Secção transversal da viga V6

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 25,4 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 22,87 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,12 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,39$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.7: Dados inseridos no programa para o modelo V6

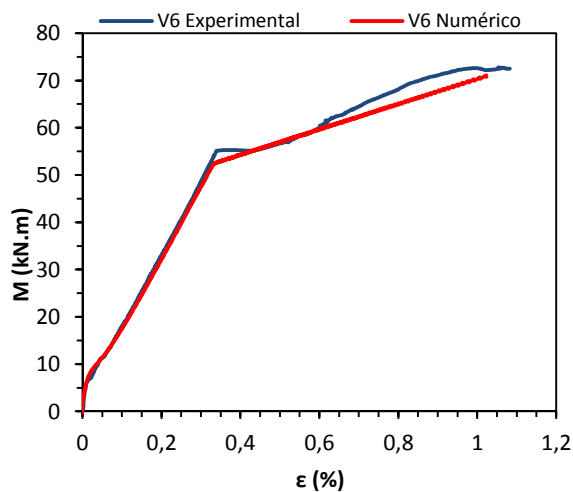


Figura 6.45: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V6 (dados numéricos e experimentais)

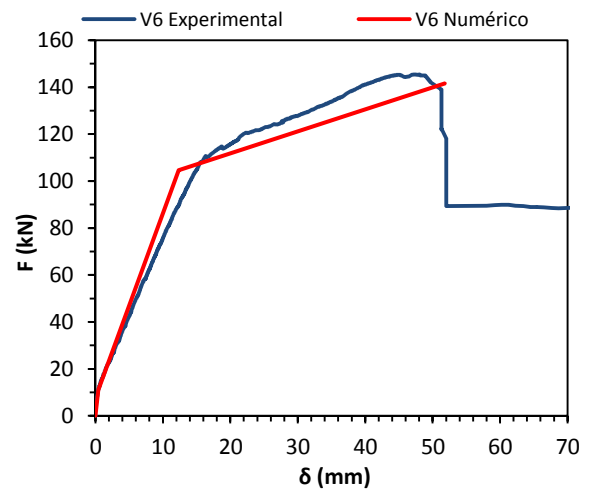


Figura 6.46: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V6 (dados numéricos e experimentais)

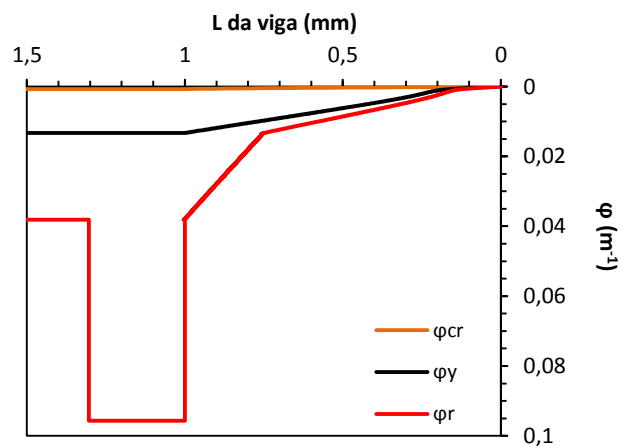
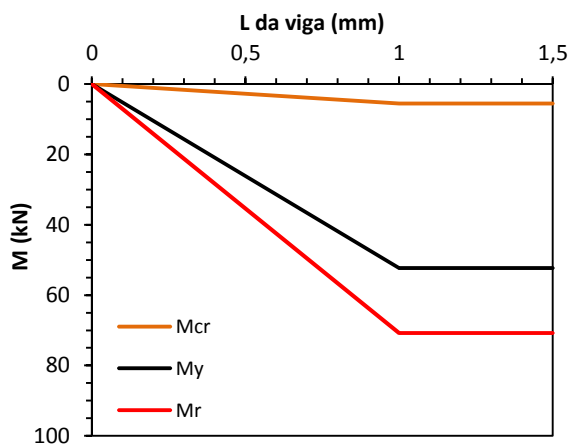


Figura 6.47: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V6

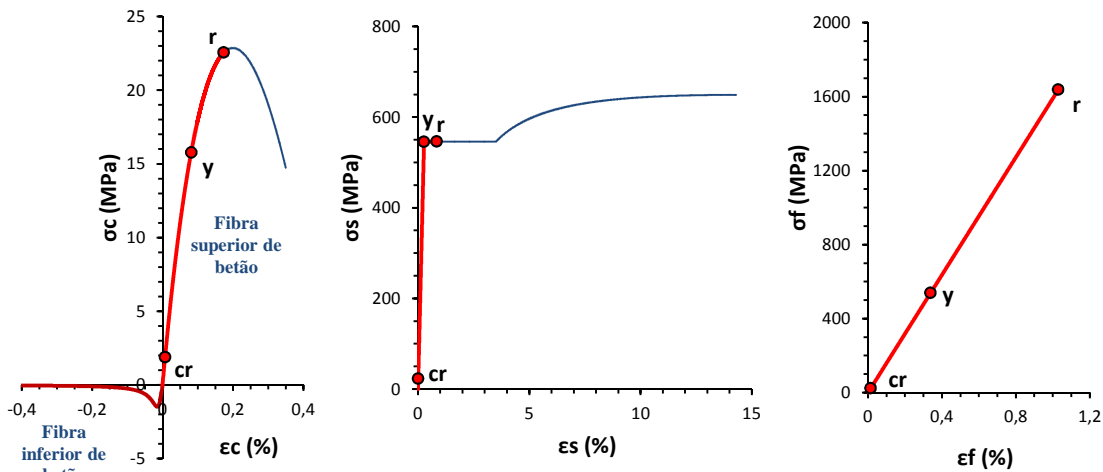


Figura 6.48: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V6

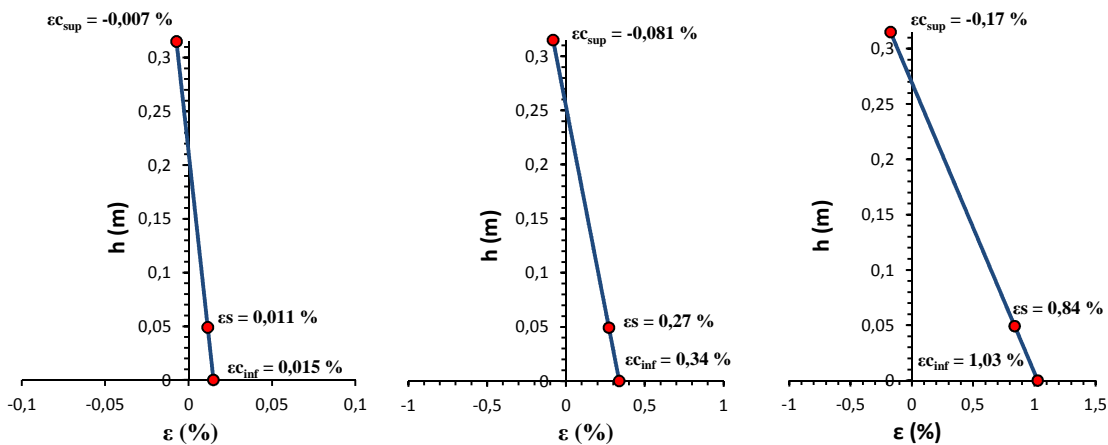


Figura 6.49: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V6

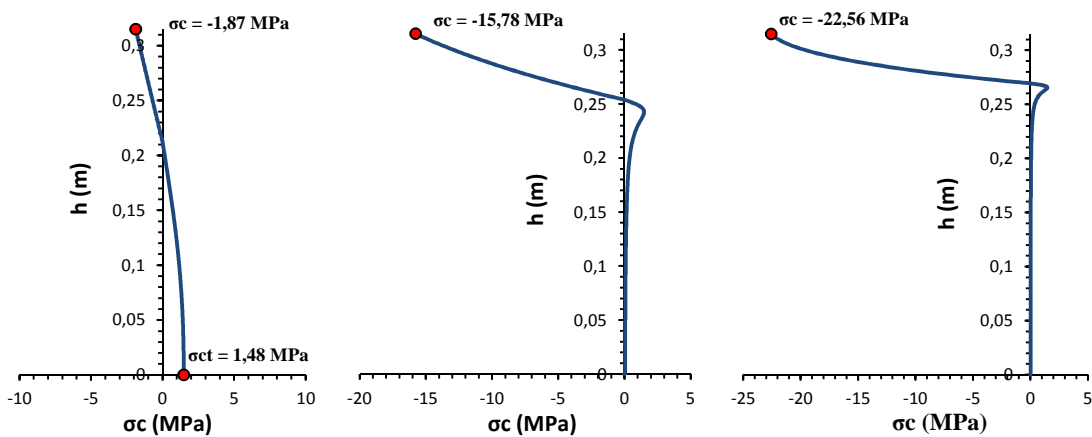


Figura 6.50: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V6

• *Modelação da viga V7*

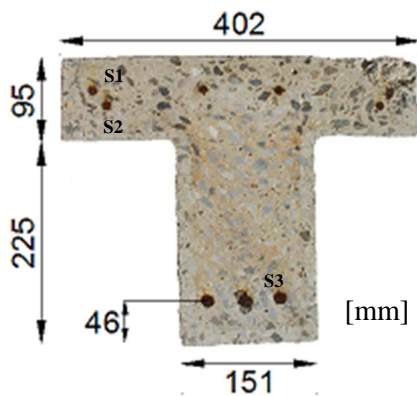


Figura 6.51: Secção transversal da viga V7

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 25,4 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 22,88 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,12 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,39$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.8: Dados inseridos no programa para o modelo V7

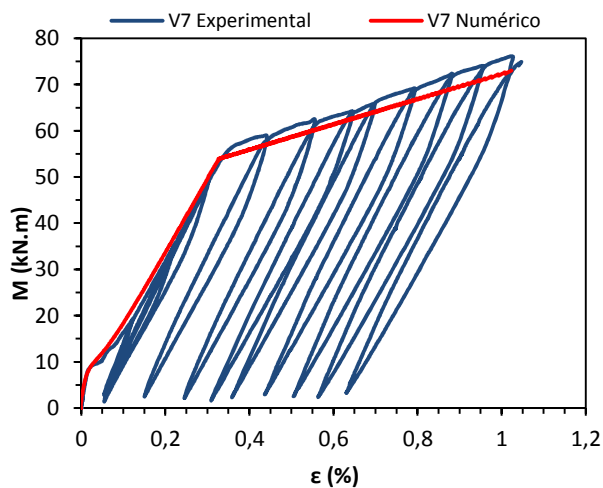


Figura 6.52: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V7 (dados numéricos e experimentais)

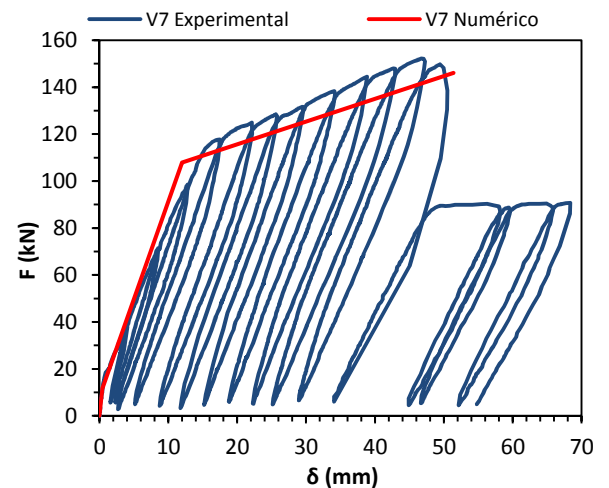


Figura 6.53: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V7 (dados numéricos e experimentais)

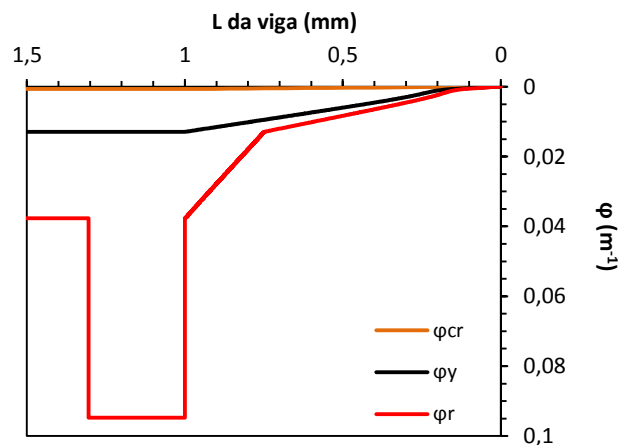
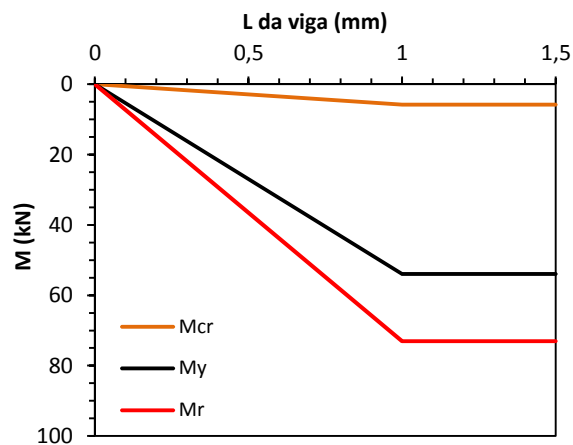


Figura 6.54: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V7

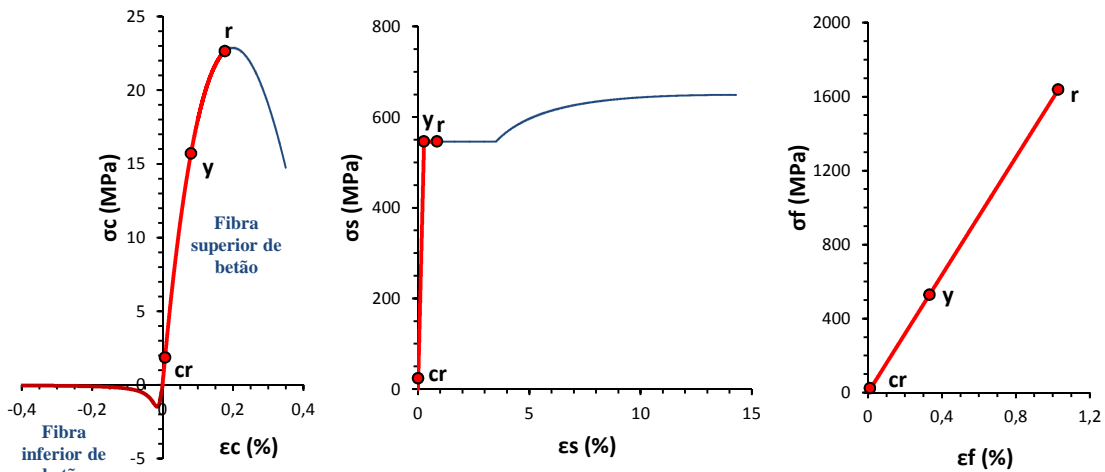


Figura 6.55: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V7

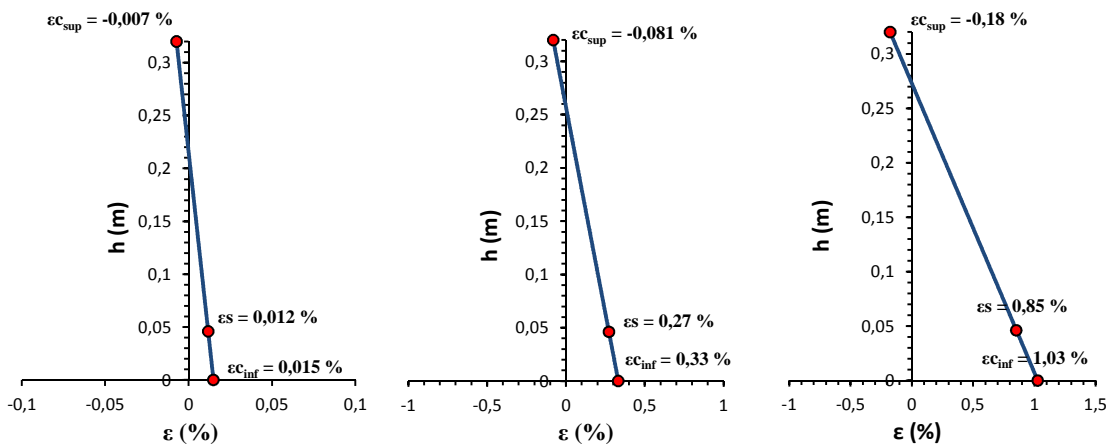


Figura 6.56: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V7

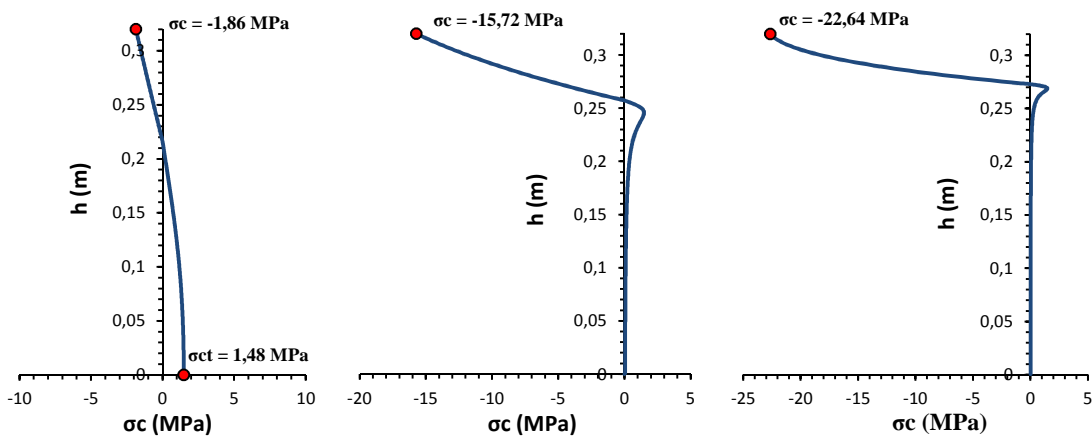


Figura 6.57: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V7

• *Modelação da viga V8*

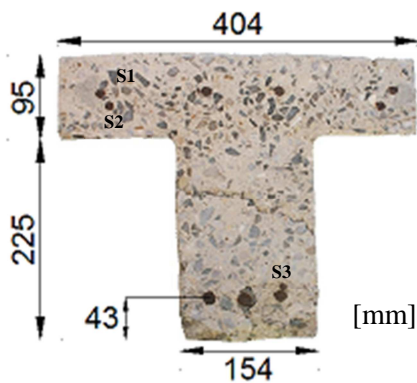


Figura 6.58: Secção transversal da viga V8

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 25,39 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 22,90 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,12 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,41$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.9: Dados inseridos no programa para o modelo V8

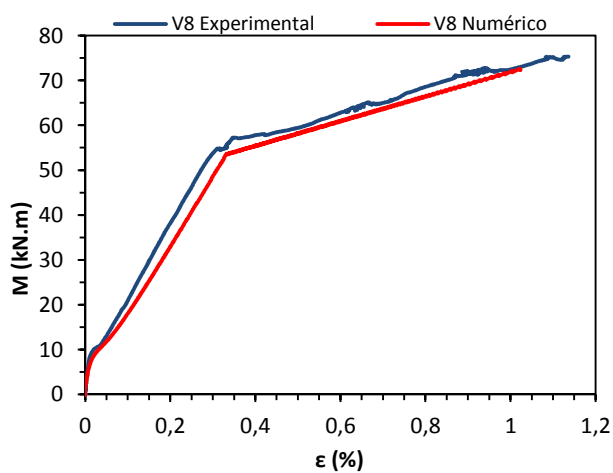


Figura 6.59: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V8 (dados numéricos e experimentais)

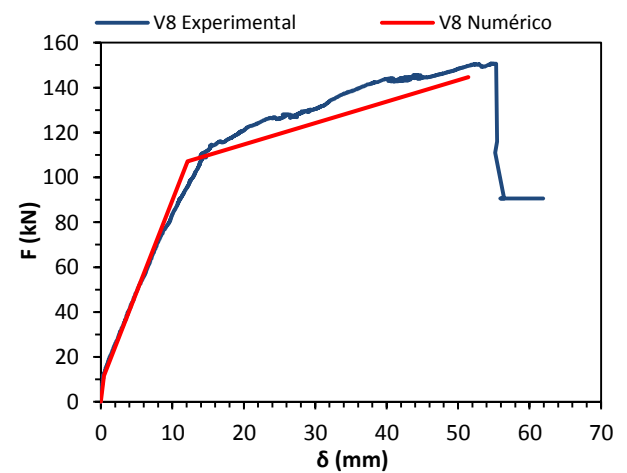


Figura 6.60: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V8 (dados numéricos e experimentais)

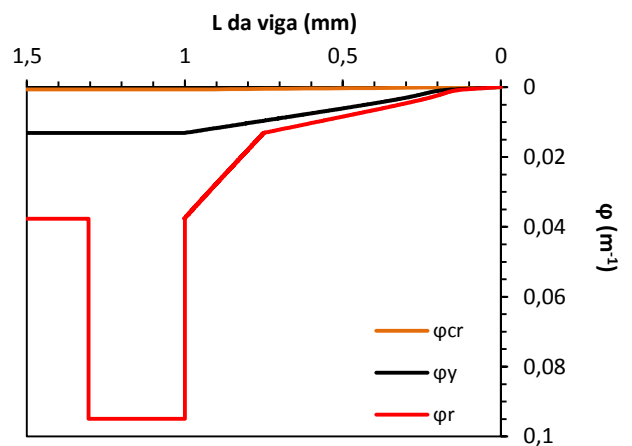
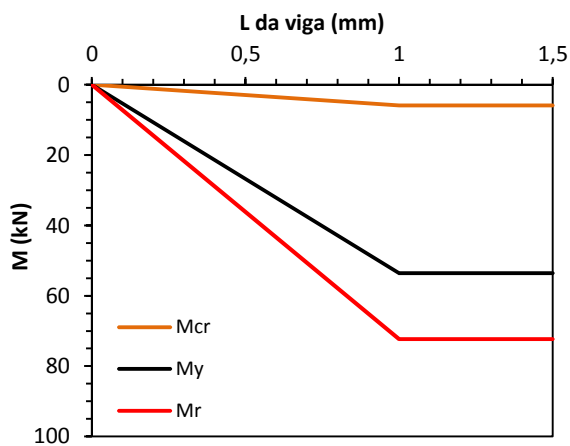


Figura 6.61: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V8

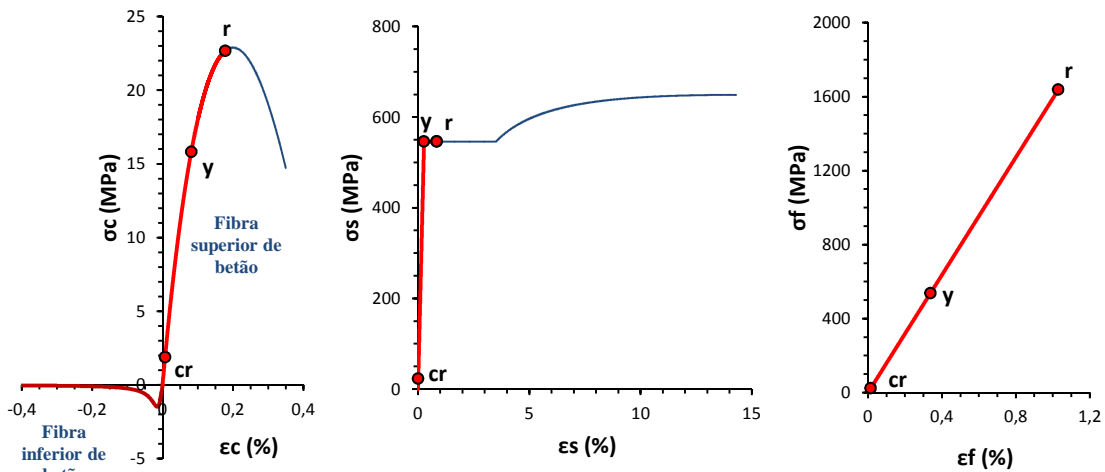


Figura 6.62: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V8

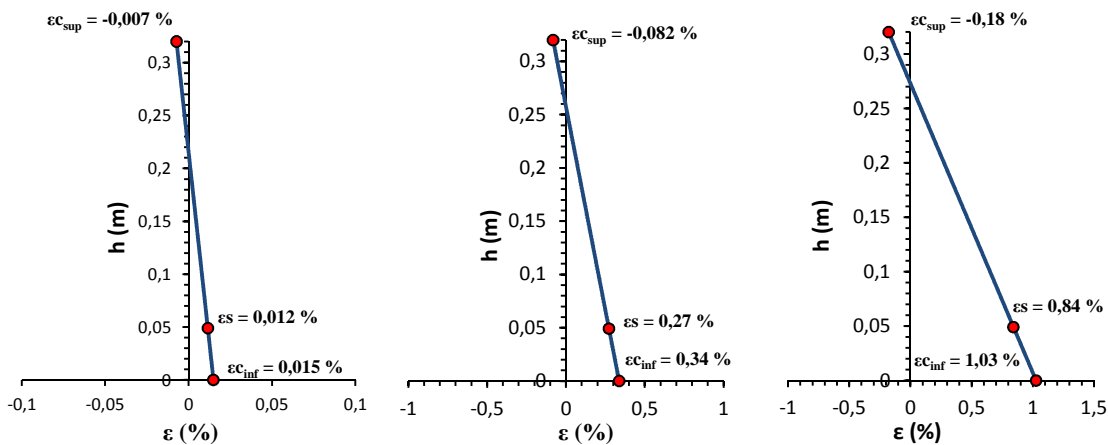


Figura 6.63: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V8

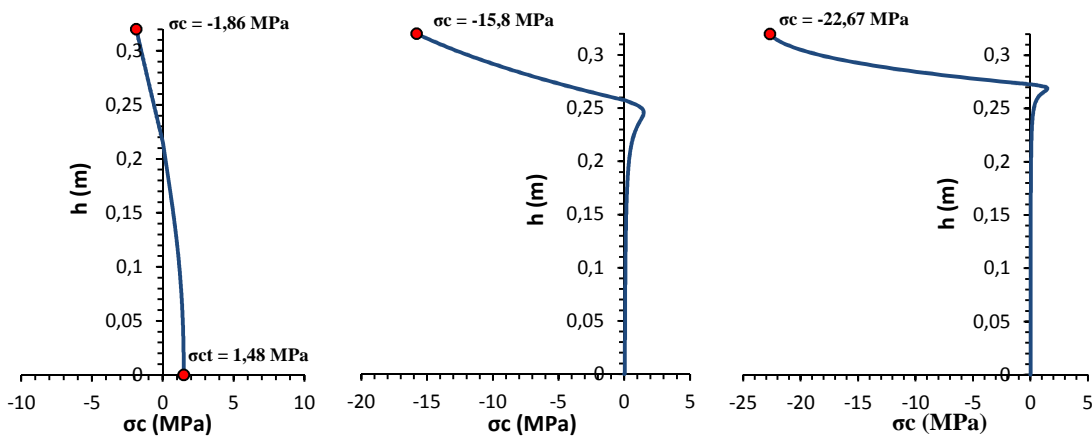


Figura 6.64: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V8

• *Modelação da viga V9*

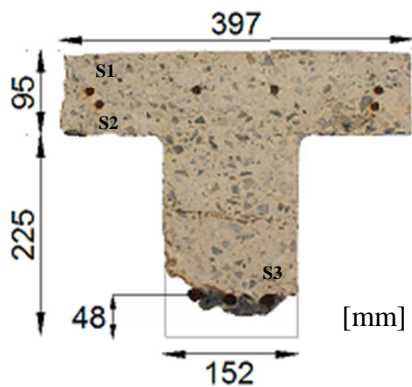


Figura 6.65: Secção transversal da viga V9

Dados		
Betão:	Aço:	CFRP:
$E_c = 25,4 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 22,93 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,13 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,38$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.10: Dados inseridos no programa para o modelo V9

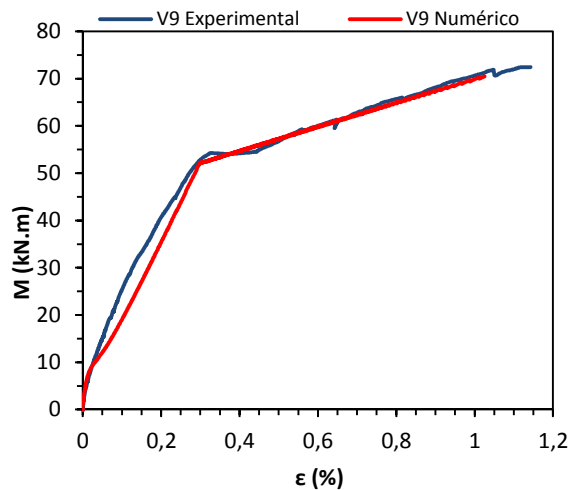


Figura 6.66: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V9 (dados numéricos e experimentais)

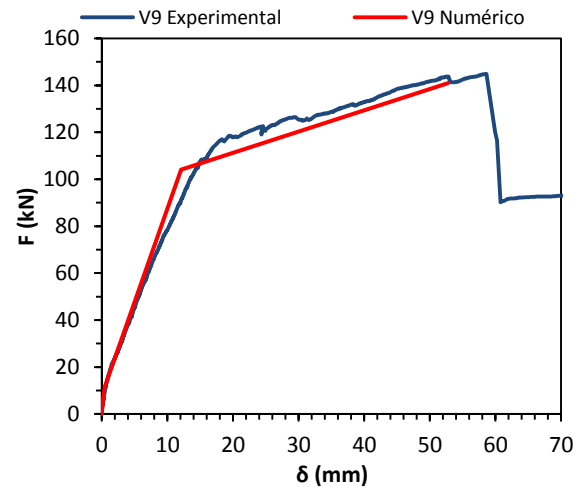


Figura 6.67: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V9 (dados numéricos e experimentais)

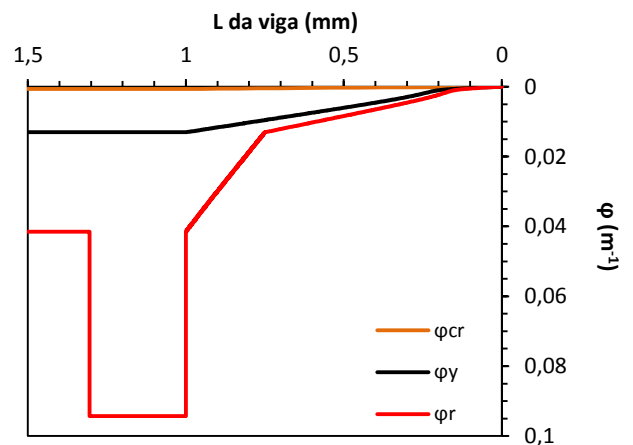
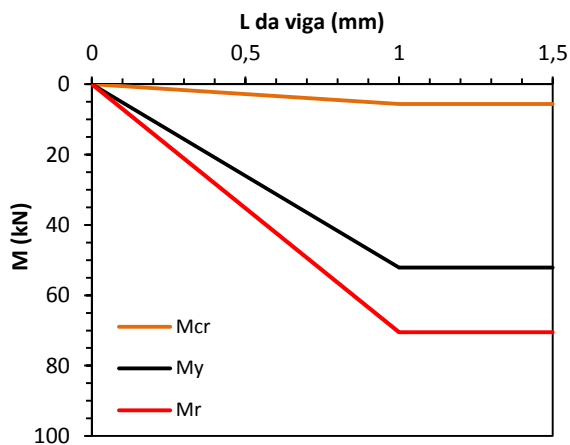


Figura 6.68: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V9

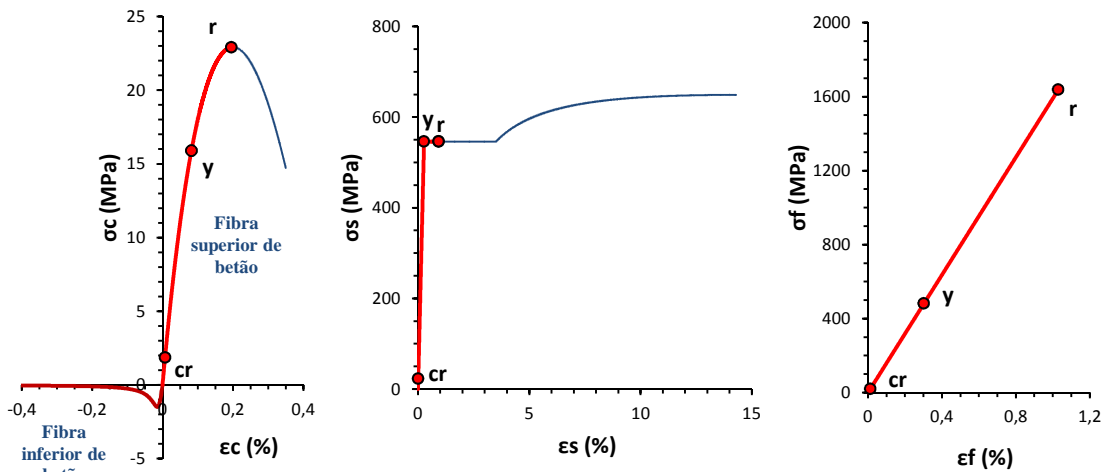


Figura 6.69: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V9

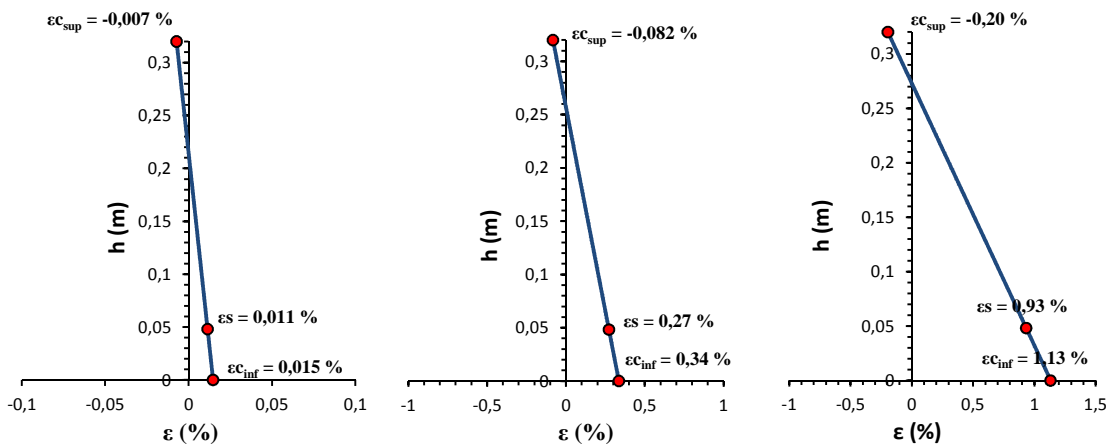


Figura 6.70: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V9

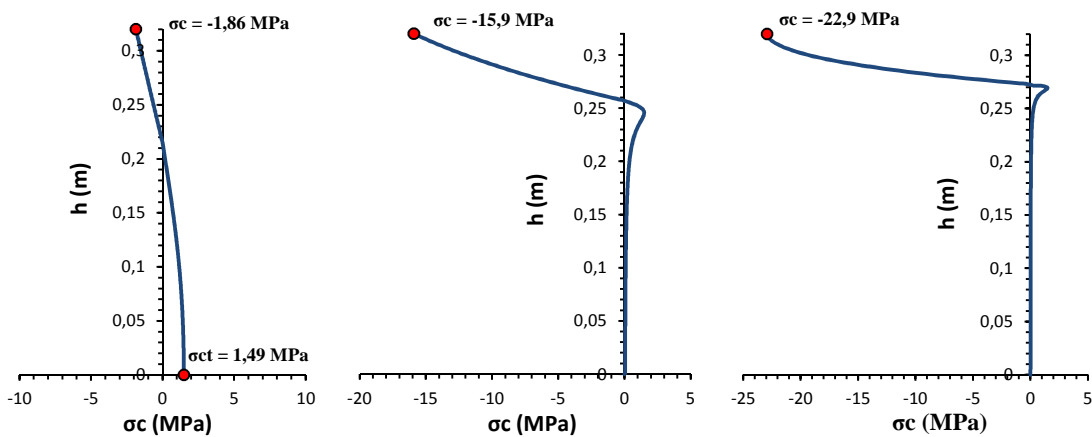


Figura 6.71: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V9

• *Modelação da viga V10*

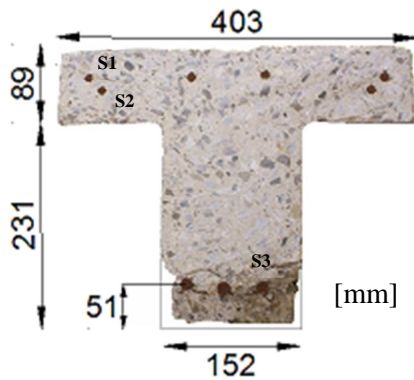


Figura 6.72: Secção transversal da viga V10

Dados		
<u>Betão:</u>	<u>Aço:</u>	<u>CFRP:</u>
$E_c = 25,4 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ MPa (S1, S2 e S3)}$	$E_f = 159 \text{ MPa}$
$f_{cm} = 22,94 \text{ MPa}$	$\phi_L = \begin{cases} 8 \text{ mm (S1 e S2)} \\ 12 \text{ mm (S3)} \end{cases}$	$t_f = 1,4 \text{ mm}$
$f_{ctm} = 2,13 \text{ MPa}$	$\phi_T = 6 \text{ mm}$	$b_f = 10 \text{ mm}$
$\varepsilon_{c1} = 0,2\%$	$f_{ym} = \begin{cases} 566 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 546 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$\varepsilon_f = 1,03 \%$
$\varepsilon_{cu1} = 0,35\%$	$f_{tm} = \begin{cases} 680 \text{ MPa (S1 e S2)} \\ 649 \text{ MPa (S3)} \end{cases}$	$n_f = 4 \text{ laminados}$
$n_p = 2,39$		$u_f = 10 \times 4 \text{ mm}$

Tabela 6.11: Dados inseridos no programa para o modelo V10

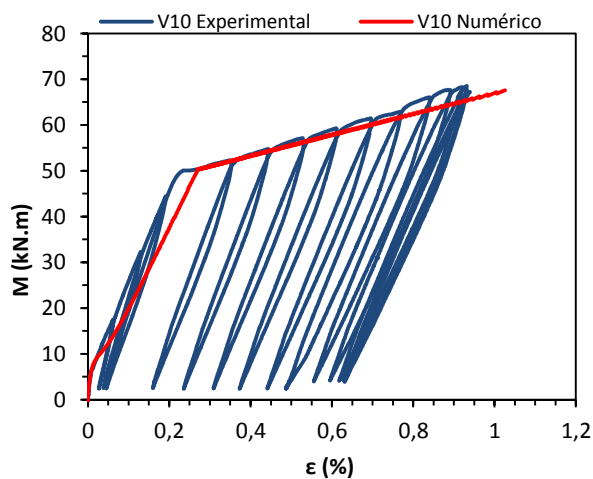


Figura 6.73: Diagrama Momento vs Extensão no FRP da viga V10 (dados numéricos e experimentais)

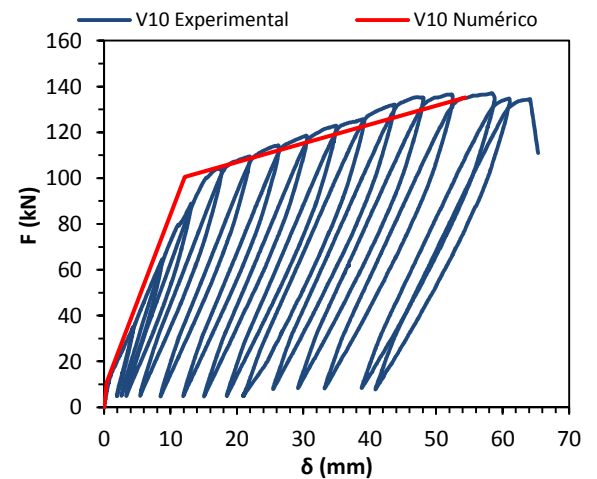


Figura 6.74: Diagrama Força vs Deslocamento da viga V10 (dados numéricos e experimentais)

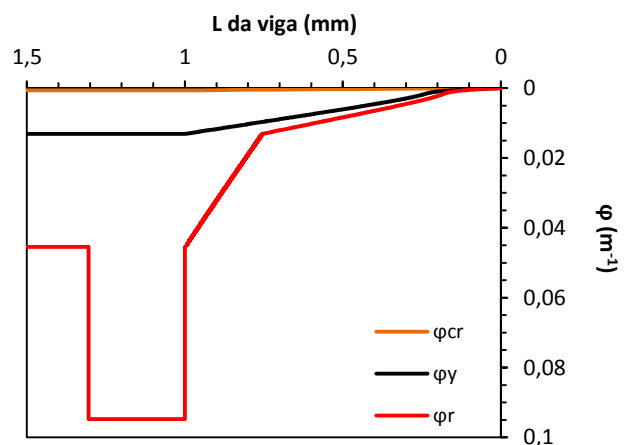
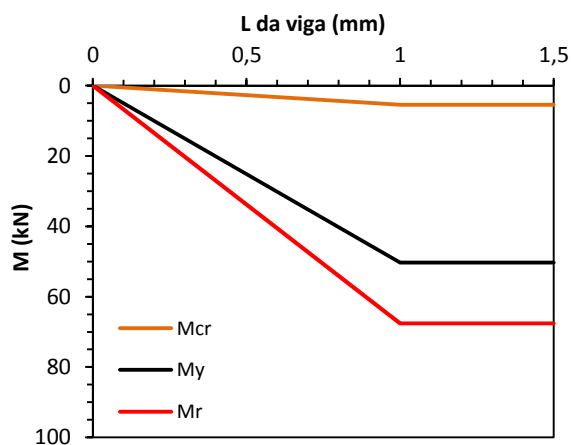


Figura 6.75: Diagrama de momentos flectores (à esquerda) e Curvaturas (à direita) ao longo do comprimento do elemento para a modelação da viga V10

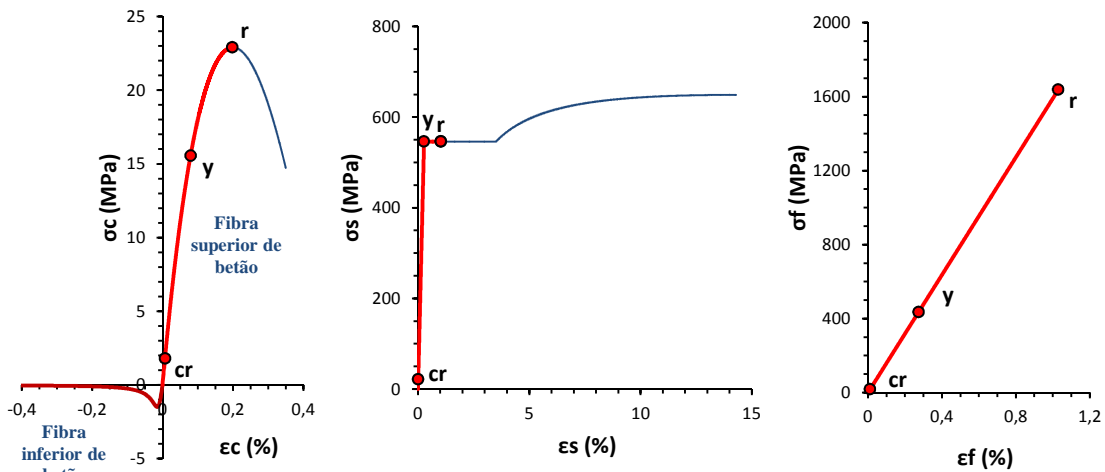


Figura 6.76: Diagramas Tensão vs Extensão do betão, aço e CFRP para a fendilhação (cr), cedência (y) e rotura (r) da viga V10

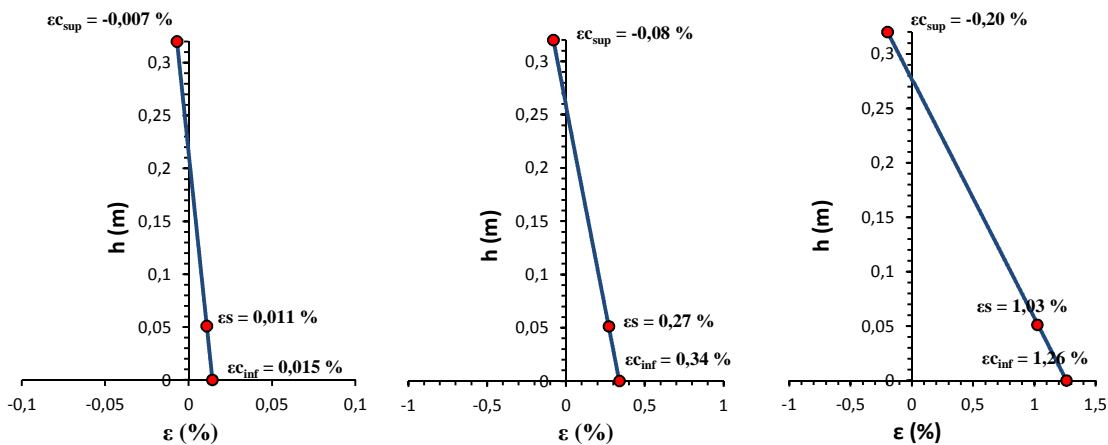


Figura 6.77: Campo de extensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V10

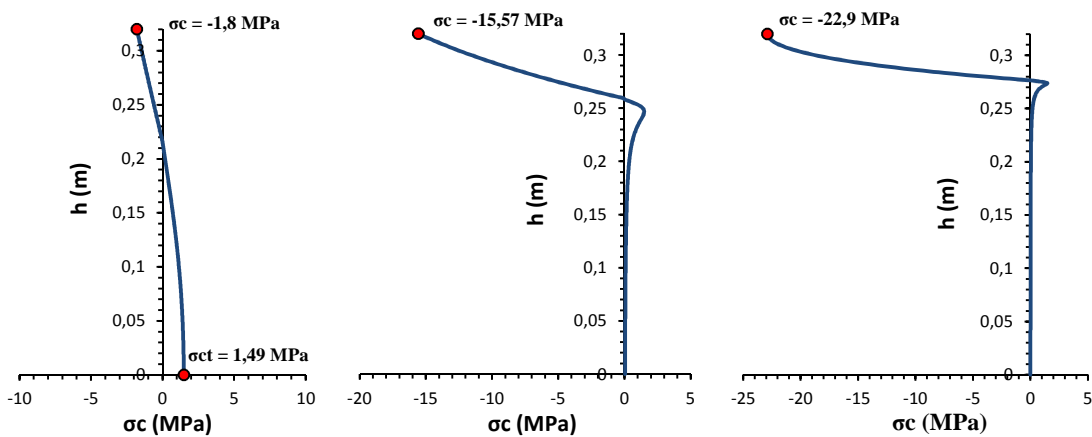


Figura 6.78: Campo de tensões da secção de meio vão na fendilhação, cedência e rotura da modelação da viga V10

A Tabela 6.12, pretende resumir os principais dados numéricos e experimentais obtidos através do programa de cálculo e dos ensaios das vigas reforçadas. Uma vez que o betão não foi instrumentado, não será possível proceder a uma comparação com os respectivos valores numéricos, e portanto estes não serão apresentados na tabela. Refira-se que, pelo facto de não ter sido possível retirar valores coerentes da leitura dos extensómetros colados nos varões longitudinais das vigas V1 e V7, estes não serão também apresentados na Tabela 6.12.

		Fendilhação (cr)				Cedência (y)				Rotura (r)			
		<i>M</i> (kN.m)	ϵ_s (%)	ϵ_f (%)	δ (mm)	<i>M</i> (kN.m)	ϵ_s (%)	ϵ_f (%)	δ (mm)	<i>M</i> (kN.m)	ϵ_s (%)	ϵ_f (%)	δ (mm)
V1	EXP	3,2	-	-	0,52	42,75	-	-	16,79	-	-	-	-
	NUM	4,25 (+33%)	0,012	-	0,36 (-31%)	42,96 (+1%)	0,27	-	12,24 (-27%)	42,96	2,5	-	45,2
V2	EXP	5,1	0,011	0,016	0,57	55,8	0,28	0,35	16,6	59,5	-	0,55	22,2
	NUM	5,65 (+11)	0,012 (+9%)	0,015 (-6%)	0,42 (-26%)	54,9 (-2%)	0,27 (-4%)	0,338 (-3%)	12,2 (-27%)	61,52 (+3%)	0,45	0,55 (0%)	23 (+4%)
V3	EXP	4,8	0,011	0,013	0,74	52,8	0,27	0,39	17	59,3	-	0,62	24,6
	NUM	5,2 (+8)	0,012 (+9%)	0,015 (+15%)	0,42 (-43%)	52,5 (-1%)	0,27 (0%)	0,338 (-13%)	12,6 (-26%)	59,2 (0%)	0,45	0,55 (-11%)	24 (-2%)
V4	EXP	4,9	0,011	0,01	0,84	54,2	0,25	0,32	17	67,5	-	0,96	39,02
	NUM	5,3 (+8%)	0,011 (0%)	0,014 (+40%)	0,4 (-52%)	52 (-4%)	0,27 (+8%)	0,341 (+7%)	12,5 (-26%)	65,3 (-3%)	0,68	0,84 (-13%)	40,6 (+4%)
V5	EXP	5	0,01	0,008	0,7	55,9	0,27	0,35	18,1	67,4	-	0,77	36
	NUM	5,4 (+8%)	0,011 (+10%)	0,014 (+75%)	0,4 (-43%)	53 (-5%)	0,27 (0%)	0,332 (-5%)	12,2 (-33%)	66,5 (-1%)	0,7	0,84 (+9%)	40,6 (+13%)
V6	EXP	4,71	0,01	0,007	0,34	54,9	0,26	0,388	16,14	72,7	-	1,01	47,5
	NUM	5,6 (+18%)	0,011 (+10%)	0,015 (+114%)	0,42 (+24%)	52,33 (-1%)	0,27 (+4%)	0,339 (-13%)	12,3 (-24%)	70,8 (-3%)	0,84	1,03 (+2%)	51,8 (+9%)
V7	EXP	8,1	-	0,016	0,69	56,86	-	0,37	15,3	74,9	-	1,05	49,5
	NUM	5,8 (-28%)	0,012	0,015 (-6%)	0,42 (-39%)	54 (-5%)	0,27	0,333 (-10%)	12 (-22%)	73,02 (-3%)	0,85	1,03 (-2%)	51,4 (+4%)
V8	EXP	4,56	0,011	0,005	0,45	55	0,28	0,332	14,8	75,3	-	1,14	55,5
	NUM	5,9 (+29%)	0,012 (+9%)	0,015 (+200%)	0,42 (-7%)	53,6 (-3%)	0,27 (-4%)	0,338 (+2%)	12,1 (-18%)	72,4 (-4%)	0,84	1,03 (-10%)	51,4 (-7%)
V9	EXP	4,63	0,01	0,008	0,44	54,3	0,26	0,409	15,65	72,45	-	1,14	58,65
	NUM	5,65 (+22%)	0,011 (+10%)	0,013 (+63%)	0,41 (-7%)	52,1 (-4%)	0,27 (+4%)	0,303 (-26%)	12,1 (-23%)	70,5 (-3%)	0,93	1,03 (-10%)	52,7 (-10%)
V10	EXP	4,8	0,01	0,006	0,58	50	0,245	0,25	15,33	67,2	-	0,98	64,16
	NUM	5,4 (+13%)	0,011 (+10%)	0,011 (+83%)	0,4 (-31%)	50,3 (+1%)	0,27 (+10%)	0,274 (+10%)	12,2 (-20%)	67,6 (+1%)	1,03	1,03 (+5%)	54,4 (-15%)

Tabela 6.12: Resumo dos dados numéricos e experimentais obtidos a meio vão das vigas V1 a V10

6.6 Análise dos resultados numéricos

No sentido de tirar conclusões acerca do desempenho do programa de cálculo face aos ensaios experimentais, é realizada uma análise entre ambos ao longo deste subcapítulo. A análise comparativa entre os dados numéricos e os dados experimentais será realizada tendo em conta as

diversas fases pertencentes aos regimes de comportamento das vigas estudadas, bem como os instantes da fendilhação do betão, cedência das armaduras e rotura do CFRP.

No que diz respeito à fendilhação do betão dos vários modelos analisados, verifica-se através da Tabela 6.12 que, de uma forma geral, os valores numéricos e experimentais não estão totalmente coincidentes. O tipo de cálculo utilizado para extrapolar alguns parâmetros referentes às propriedades do betão com base na idade do mesmo, pode ter levado a caracterizar menos bem o comportamento do betão em tração nos modelos numéricos. Recorde-se que o valor de f_{ctm} foi obtido através de ensaios de tração levados a cabo aos 28 dias após a betonagem, e que este valor foi posteriormente extrapolado com base em expressões empíricas, tendo em conta a idade do betão na data dos ensaios realizados. Para além disto, a ligeira pré-fendilhação detectada no betão das vigas e causada pelos efeitos da retração do mesmo pode explicar as diferenças de resultados obtidos.

Na cedência das armaduras é possível constatar que, de uma forma genérica, os resultados numéricos se aproximam satisfatoriamente dos dados experimentais. É ao nível dos momentos flectores neste instante que se verifica o maior grau de proximidade entre os valores numéricos e os experimentais, com as maiores diferenças a serem detectadas nas vigas V5 e V7, onde os momentos flectores vindos do cálculo numérico são inferiores aos experimentais em 5%. Analisando também as extensões nos varões de aço é possível verificar a coerência que todos os resultados da modelação apresentaram comparativamente aos dados experimentais, cujas diferenças não foram para além dos 10%. Quanto às extensões no CFRP constata-se que, apesar da maior diferença observada entre a modelação e os resultados experimentais da viga V9 (-26 %), todos os laminados dos restantes modelos numéricos apresentam razoáveis coincidências. Contudo, verifica-se que nos deslocamentos verticais obtidos pela modelação na cedência, comparativamente aos valores experimentais, se observam variações entre 20 e 30%. Devido às diferenças referidas constata-se, pela observação dos diagramas Força vs Deslocamento anteriormente apresentados, a maior rigidez apresentada especialmente na fase final do regime de pós-fendilhação das vigas estudadas.

Em termos da rotura dos laminados de CFRP, as diferenças entre os resultados numéricos e experimentais também não são significativas. Ao nível dos momentos flectores, aquando da rotura do CFRP, a maior diferença verifica-se na viga V8, para a qual a respectiva modelação obteve um valor 4% inferior ao que se conseguiu experimentalmente. Para os deslocamentos verticais a meio vão, as discrepâncias observadas entre os valores numéricos e os valores experimentais também são reduzidas, principalmente no caso da viga V3 onde se verificou uma diferença de 2% em relação aos dados experimentais. No entanto, para a viga V5 os deslocamentos verticais obtidos numericamente excederam os experimentais em cerca de 13 %, podendo esta diferença estar associada ao critério de rotura adoptado para o sistema NSMR. Tal como a viga V5, na viga V10

também se registaram diferenças superiores a 10% entre os deslocamentos verticais numéricos e experimentais, sendo os primeiros inferiores em cerca de 15%. Contudo, observando os valores de extensão no CFRP verifica-se que os critérios de rotura adoptados para os diversos sistemas de reforço permitiram a determinação de valores numéricos bastante semelhantes aos obtidos experimentalmente neste material. Assim, é possível afirmar-se que o critério de limitação da extensão no CFRP para o sistema NSMR (Eq.6.24) corresponde a uma previsão aceitável, apesar das diferenças detectadas nos deslocamentos verticais a meio vão. No caso do critério proposto pelo ACI para limitar a extensão no CFRP do sistema EBR, este permitiu obter valores numéricos coincidentes com os valores experimentais. Tendo em conta que a rotura das vigas reforçadas com as técnicas EBRA e HNSMR ocorreu pelo CFRP, os resultados mostram que o critério de rotura adoptado nestes casos ($\varepsilon_{f,r} = \varepsilon_{fm}$) também é aceitável.

Com base na análise que foi realizada ao longo deste subcapítulo pode-se concluir que, apesar das diferenças observadas nos deslocamentos verticais próximos da cedência das armaduras e das dificuldades inerentes à definição de um critério de rotura adequado aos sistemas NSMR, EBRA e HNSMR, os resultados obtidos pela modelação numérica apresentam-se, de uma forma geral, bastante próximos dos valores obtidos experimentalmente. Como tal, o programa de cálculo produzido pode ser considerado como uma ferramenta válida e eficaz no dimensionamento de sistemas de reforço com CFRP.

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 Considerações gerais

Ao longo do presente capítulo apresentam-se os comentários finais ao trabalho desenvolvido, tendo em conta os objectivos que inicialmente foram propostos e os objectivos que foram alcançados. As conclusões obtidas ao longo deste estudo serão sintetizadas, e por fim são ainda apresentados alguns aspectos que podem ser considerados como possíveis desenvolvimentos futuros.

7.2 Conclusões

Ao longo do presente trabalho foram estudados dois sistemas de reforço à flexão com laminados de CFRP designados por *Externally Bonded Reinforcement Anchorage* (EBRA) e *Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement* (HNSMR), sendo o primeiro totalmente inovador. Realizou-se uma análise comparativa entre o desempenho das duas técnicas de reforço através dos ensaios de cinco vigas em betão armado com dois tipos de carregamento (monotónico e cíclico). Para além disto, este estudo compreendeu uma análise comparativa entre as técnicas desenvolvidas no âmbito desta dissertação e os sistemas EBR e NSMR já estudados por Carvalho [3]. Em *MATLAB* foi ainda realizado um programa de cálculo capaz de simular o problema em estudo, fornecendo ao utilizador informações acerca do campo de tensões e extensões na secção transversal de meio vão da viga estudada, bem como valores de deslocamentos verticais e curvaturas para os respectivos momentos atuantes. Aos resultados experimentais, foram comparados os resultados obtidos com a modelação numérica de cada viga estudada.

Em termos de comportamento estrutural verificou-se que na cedência, tanto as técnicas EBRA e HNSMR como as técnicas EBR e NSMR permitiram incrementos de resistência bastante semelhantes, relativamente à viga não reforçada (V1). Já na rotura, o sistema EBRA contabilizou um aumento da força máxima de 76% em relação à viga de referência e de 27% relativamente ao sistema EBR. Da mesma forma, o sistema HNSMR permitiu um aumento de 70% em relação ao modelo não reforçado e 7% em relação à técnica NSMR.

Em termos de rigidez global dos elementos verificou-se que a técnica EBRA apresentou sempre valores superiores comparativamente à observada no sistema HNSMR. Por outro lado, torna-se clara a maior ductilidade que os sistemas EBRA e HNSMR permitem até à situação de rotura,

comparativamente aos sistemas EBR e NSMR. Tal facto pode ser observado através do incremento de 275% nas deformações do instante de colapso dos sistemas EBRA e HNSMR, relativamente ao verificado na cedência (recorde-se que os sistemas EBR e NSMR permitiram incrementos de deformação na rotura de 24% e 111%, respectivamente).

A análise dos resultados experimentais da viga V6 permitiram concluir que o desalinhamento na colagem dos laminados de CFRP influenciaram parâmetros importantes como a resistência, ductilidade após a cedência e a rigidez do sistema global, afectando assim o desempenho do sistema de reforço.

No que diz respeito aos mecanismos de rotura, foi possível constatar a total mobilização do CFRP e posterior rotura do mesmo em ambas as situações de reforço, registando-se contudo algumas diferenças. No sistema EBRA a rotura deu-se através da rotura total dos laminados, nas zonas de formação das rótulas plásticas e sem que se verificasse qualquer destacamento do betão. Já o sistema HNSMR, apresentou um mecanismo de rotura segundo duas origens distintas. Enquanto num dos modelos se verificou a rotura do CFRP no interior do rasgo, sem que o betão de recobrimento destacasse, no outro, ocorreu o escorregamento de um dos laminados de CFRP, sendo posteriormente destacado parte do betão de recobrimento.

Com base nos ensaios cíclicos realizados, verificou-se que a natureza deste tipo de carregamento não prejudicou a resposta da estrutura. De uma forma geral, todos os parâmetros analisados em ambos os sistemas revelaram-se relativamente próximos dos obtidos nos ensaios monotónicos, podendo concluir-se que as técnicas em análise são eficientes, quer para cargas monotónicas quer para cargas cíclicas.

Quanto ao processo de aplicação, constatou-se que estes processos revelaram-se fáceis e rápidos de executar, comparativamente a outras técnicas mais tradicionais (encamisamento de betão e adição de chapas coladas). No entanto, as dificuldades inerentes à aplicação do sistema HNSMR em estruturas porticadas tridimensionais, poderá ser uma desvantagem. Ao contrário da técnica EBR, no sistema EBRA é necessário realizar os furos de amarração do CFRP, contudo o desempenho desta solução justifica plenamente a realização dos mesmos, tendo em conta a possibilidade da resistência do compósito ser totalmente mobilizada.

Com base na análise realizada aos resultados obtidos conclui-se que, os sistemas EBRA e HNSMR revelaram-se soluções extremamente eficientes no reforço à flexão de vigas em betão armado. A total utilização das capacidades do CFRP que estes sistemas permitem, obriga a que os elementos reforçados apresentem um desempenho significativamente melhor, comparativamente aos sistemas EBR e NSMR.

A simulação dos ensaios das vigas V1 a V10 através do programa de calculo desenvolvido mostrou que este simula bem o comportamento de vigas reforçadas com diversas técnicas de reforço utilizando compósitos de FRP, podendo considerar-se uma ferramenta válida e eficaz sempre que se pretenda a simulação do comportamento não-linear de vigas reforçadas com compósitos de FRP

7.3 Desenvolvimentos futuros

Tendo-se alcançado, de uma forma geral, todos os objectivos inicialmente propostos no âmbito deste trabalho, serão de seguida enumerados alguns aspectos que devem ser considerados como possíveis desenvolvimentos futuros.

- i. Com o objectivo de economizar os sistemas EBRA e HNSMR, seria importante estudar o desempenho dos mesmos com a utilização de elementos de reforço de materiais mais baratos que os compósitos de fibras de carbono (CFRP);
- ii. Tendo em conta o bom desempenho apresentado pelas técnicas EBRA e HNSMR em vigas bi-apoiadas, seria interessante implementar estes sistemas em estruturas com diferentes condições de apoio, de forma a realizar a mesma análise comparativa de que foi alvo este estudo. Para além disto, no sentido de alargar o conhecimento acerca dos mecanismos de colapso característicos dos sistemas em estudo, seria importante substituir as duas cargas pontuais que foram aplicadas nas vigas já ensaiadas, por outras formas de carregamento.
- iii. No que diz respeito aos furos de amarração do CFRP no sistema EBRA, é necessário realizar um estudo com o objectivo de obter o comprimento mínimo necessário de amarração, sem pôr em causa o correto desempenho do sistema de reforço.
- iv. De forma a aumentar o campo de utilização do programa de cálculo realizado é necessário adicionar ao mesmo a opção de novos materiais (e respectivas leis constitutivas) e a possibilidade de introdução de novas geometrias de secções transversais.

Bibliografia

1. JUVANDES, L., *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de "CFRP"*, Phd, 1999, FEUP: Porto.
2. BISCAIA, H., *Comportamento e modelação da ligação GFRP/Betão em elementos de betão armado expostos a ambientes agressivos*, Phd, in FCT2012, Universidade Nova de Lisboa: Lisboa.
3. CARVALHO, T., *Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP*, Msc, 2010, Universidade Nova de Lisboa (FCT): Lisboa.
4. FERNANDES, P., *Comportamento diferido e durabilidade da ligação entre o betão e laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM*, 2013, Universidade do Minho: Guimarães.
5. FIRMO, J., *Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP) - Desenvolvimento de sistemas de protecção ao fogo*, Msc, 2010, Universidade Técnica de Lisboa (IST): Lisboa.
6. TALJSTEN, B., *THE IMPORTANCE OF BONDING – AN HISTORIC OVERVIEW AND FUTURE POSSIBILITIES*, in *International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*2005: Hong Kong, China.
7. ZEFERINO, A. and J. MARTINS, *Pedras Naturais*, in *Materiais de Construção I*2006: Faculdade de Engenharia da Universidade do Minho.
8. CARRAZEDO, R., *Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono*, Msc, 2002, Universidade de São Paulo: São Carlos.
9. LAWRENCE, C.B., *Composites for Construction: Structural design with FRP materials*, ed. I. John Wiley & Sons. 2006, Hoboken, New Jersey.
10. DOMONE, P. and J. ILLSTON, *Construction materials their nature and behaviour*. 4th edition ed. 2010. 348-364.
11. <http://www.kurzweilai.net/disneys-monsanto-house-of-the-future-from-1957>. [cited 2013, 25 de Maio].
12. <http://www.archdaily.com>. [cited 2013, 3 de Junho].
13. <http://www.flickrriver.com>. [cited 2013, 2 de Junho].
14. BLANKSVARD, T., *Strengthening of concrete structures by the use of mineral based composites*, Phd, 2007, Lulea University of Technology: Lulea.
15. BARROS, J.A.O., *Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão : parte I : propriedades e técnicas*, 2007, Publindústria.
16. <http://www.engenhariacivil.com/reforco-estruturas-compositos-fibras-carbono-frp>. [cited 2013, 1 de Junho].

17. SOARES, A.M. and J.G. MARTINS, *Reforço de Estruturas de Betão Armado com CFRP*, Monografia, 2006: UFP.
18. <http://portuguese.alibaba.com>. [cited 2013, 26 de Maio].
19. http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbonon. [cited 2013, 29 de Maio].
20. FIB, *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, b. 14, Editor 2001, International Federation for Structural Concrete: Switzerland.
21. MATTHYS, S., *Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement*, Phd, in *Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vakgroep Bouwkundige Constructies*2000, Universiteit Gent: Gent.
22. KAISER, H.P., *Strengthening of reinforced concrete with epoxy-bonded carbon-fibre plastics*, Phd, 1989: Zurich.
23. MEIER, U. and H.P. KAISER, *Strengthening of structures with CFRP laminates*. Proc. Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Las Vegas 1991.
24. MEIER, U., *Bridge repair with high performande composite materials*, in *Material und Technik*1987.
25. COELHO, M., et al., *Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga*, 2011: Universidade do Minho.
26. DIAS, S.J.E., *Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica de inserção de laminados de CFRP*, Phd, 2008, Universidade do Minho: Guimarães.
27. SENA CRUZ, J. and J.A.O. BARROS, *Bond between Near-Surface Mounted Carbon-Fiber-Reforced Polymer Laminate Strips and Concrete*. Journal of composites for construction (ASCE), 2004.
28. CARNEIRO, L.A. and A.M. TEIXEIRA, *Aplicações de materiais compósitos de resina e fibras na engenharia de construção*. 2009.
29. <http://www.engenhariacivil.com/tecnicas-reforco-estruturas-betao>. [cited 2013, 1 de junho].
30. CHASTRE RODRIGUES, C., *Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçado com materiais compósitos*, Phd, 2005, Universidade Nova de Lisboa (FCT): Lisboa.
31. <http://www.reinforcement.ch>. [cited 2013, 26 de Maio].
32. BADAWI, M. and K. SOUDKI, *Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods – Experimental and analytical investigation*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(10): p. 3292-3300.
33. SENA CRUZ, J., *Técnica NSM - Uma nova abordagem no reforço de estruturas com materiais compósitos*, in *Inovação e Reabilitação*2008, Publindústria. p. 27-30.
34. AL-MAHMOUD, F., et al., *Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods*. Composite Structures, 2009. **91**(2): p. 138-147.

35. KOTYNIA, R., *Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement*. Construction and Building Materials, 2012. **32**: p. 41-54.
36. <http://www.wtcb.be>. [cited 2013, 24 de Abril].
37. BANK, L., *Mechanically-Fastened FRP (MF-FRP) – A Viable Alternative for Strengthening RC Members*, in *FRP Composites in Civil Engineering - CICE 2004*. 2004, Taylor & Francis. p. 3-15.
38. SENA CRUZ, J., *FRP's - Reforço Estrutural*, in *HILTI Tech2012*. p. 17-18.
39. SENA CRUZ, J., et al., *Eficiência de diferentes técnicas de reforço á flexão de vigas de betão armado*, in *BE2010 - Encontro Nacional Betão Estrutural2010*: Lisboa.
40. NAPOLI, A., *RC Structures Strengthened with Mechanically Fastened FRP Systems*, Msc, 2008, University of Miami: Florida.
41. SENA CRUZ, J., *Reabilitação e reforço de estruturas*, in *Aula 17: Projecto de reforço com FRP2011/2012*: IST.
42. MORGAN, D.R., *Compatibility of concrete repair materials and systems*. Construction and Building Materials, 1996. **10**: p. 57-67.
43. WIBERG, A., *Strengthening of concrete beams using cementitious carbon fibre composites*, Phd, 2003, Royal Institute of Technology: Stockholm Sweden.
44. EMMONS, P.H. and A.M. VAYSBURD, *System concept in design and construction of durable concrete repairs*. Construction and Building Materials, 1996. **10**: p. 69-75.
45. RODRIGUES, T., *Reforço de estruturas com FRP's*, Msc, 2009, Universidade de Aveiro: Aveiro.
46. KOLSCH, H., *Carbon fiber cement matrix (CFCM) overlay system for masonry strengthening*. Journal of composites for construction (ASCE), 1998.
47. ROMEIRA, T., *Estudo do comportamento de vigas de betão simples e reforçadas com CFRP sujeitas a envelhecimento*, Msc, 2012, Universidade Nova de Lisboa (FCT): Lisboa.
48. ASCE, *Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure*, 2001, American Society of Civil Engineers.
49. ISIS, *ISIS Canada Educational Module No.8: Durability of FRP Composites for construction*, 2006.
50. BUYUKOZTURK, O., O. GUNES, and E. KARACA, *Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites*. Construction and Building Materials, 2004. **18**(1): p. 9-19.
51. RIZKALLA, S.H. and K.A. SOUDKI, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. ACI committee 440, 2000.
52. FIB, *Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs*, in *With emphasis on seismic applications*, b. 35, Editor 2006, International Federation for Structural Concrete: Switzerland.

53. DE LORENZIS, L. and J.G. TENG, *Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*. Composites Part B: Engineering, 2007. **38**(2): p. 119-143.
54. AZEVEDO, D., *Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP (Recomendações para dimensionamento)*, Msc, 2008, FEUP: Porto.
55. BROSENS, K., O. AHMED, and D. VAN GEMERT, *STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURES WITH EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT*, in *DESIGN PHILOSOPHY AND PRACTICAL APPLICATIONS* 2001.
56. DA SILVA, P., *Modelação e análise de estruturas de betão reforçadas com FRP*, Msc, 1999, FEUP: Porto.
57. TALJSTEN, B., *Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics*, Phd, 1994, Lulea University of Technology: Lulea.
58. BISCAIA, H., C. CHASTRE RODRIGUES, and M.G. SILVA, *Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete*. Composites Part B: Engineering, 2013. **45**(1): p. 1554-1568.
59. CNR, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato*, 2007, Consiglio Nazionale delle Ricerche: Roma.
60. CNR, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato*, 2008, Consiglio Nazionale delle Ricerche: Roma.
61. CNR, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture realizzate con profili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato (FRP)*, 2008, Consiglio Nazionale delle Ricerche: Roma.
62. ACI, *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures 440R-07*, Editor.
63. MERTZ, D.R., et al., *Application of Fiber Reinforced Polymer Composites to the Highway Infrastructure*, 2003, NCHRP: Washington, D. C.
64. MIRMIRAN, A., et al., *Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites*, 2004, NCHRP: Washington, D. C.
65. ISIS-DM4, *Design Manuel 4 - Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*. Canada 2001.
66. JSCE, *Application of Continuous Fiber Reinforcing Materials to Concrete Structures*, 1992, Japan Society of Civil Engineers: Tokyo, Japan.
67. JSCE, *RECOMMENDATIONS FOR UPGRADING OF CONCRETE STRUCTURES WITH USE OF CONTINUOUS FIBER SHEETS*, 2001, JSCE Recommendations.
68. NP-ENV10002-1, *Materiais Metálicos - Ensaio de Tracção*, 1990: Comité Europeu de Normalização.
69. *EUROCÓDIGO 2 - NP EN 1992 -1-1 2010*, in *Projecto de estruturas de betão armado - Regras gerais e regras para edifícios* 2010.

70. CHASTRE RODRIGUES, C. and M.G. SILVA, *Cyclic Compression Behaviour of Polymer Concretes*. Journal of Polymer Engineering, 2007. **27**: p. 525-545.
71. JUVANDES, L.F.P. and R.M.T. BARBOSA, *Bond Analysis of Timber Structures Strengthened with FRP Systems*. Strain, 2012. **48**(2): p. 124-135.
72. BARBOSA, R.M.T., *ESTRUTURAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADA COM SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP - Análise da aderência entre os materiais*, Msc, 2008, FEUP: Porto.
73. FIB, *Model Code 2010 - Final draft*, 2011.
74. POPOVICS, S., *A numerical approach to the complete concrete stress-strain relation for concrete*, in *Cement and Concrete Research* 1973. p. 583-599.
75. ROSTASY, F.S. and U. NEUBAUER, *"S&P Clever Reinforcement Company - Expert Opinion N.º 98/0322"*, 1998.
76. FORTES, A.S. and J.A.O. BARROS, *REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO POR INTERMÉDIO DA INSERÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP NO BETÃO DE RECOBRIMENTO*. 2002.
77. CASTRO, E., G. MELO, and Y. NAKATO, *Flexural strengthening of RC "T" beams with Near Surface Mounted (NSM) FRP Reinforcements*, 2007: University of Patras, Greece.
78. HASSAN, T. and S. RIZKALLA, *Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips*. Journal of Composites for Construction (ASCE), 2003.
79. DIAS, S., J. BARROS, and C. AZEVEDO, *Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos*, in *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012* 2012: FEUP.
80. EL-MIHILMY, M.T. and J.W. TEDESCO, *Deflection of reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer (FRP) plates*. ACI Structural Journal, 2000. **97**.

Apêndice A

Pormenorização da instrumentação das vigas

Apêndice B

Ábaco para determinação do coeficiente n_p (Modelo de Popovics)

Neste apêndice é apresentado o ábaco que permite auxiliar o utilizador do programa de cálculo realizado na definição de um adequado coeficiente n_p , necessário para definir o comportamento total do betão em tração segundo o modelo de Popovics. A título de exemplo é também representado, para o betão utilizado no âmbito deste trabalho, o referido modelo para diferentes valores de n_p , os quais foram determinados através da aproximação já mencionada à função proposta pelo *Model Code 2010*.

